de critérios adequados a esse fim, apesar de, tanto quanto julgamos saber, a sua necessidade ter já sido reconhecida no nosso País em diversos estudos preliminares sobre o assunto.

A maior parte dos países dispõe hoje já de um conjunto de normas referentes, quer a materiais, caracterizando as propriedades exibidas pelos mesmos em face do fogo (reacção ao fogo), quer a elementos de construção (resistência ao fogo) estes últimos para ajuizar do tempo durante o qual tais elementos satisfazem aos requisitos funcionais adequados.

Quanto aos materiais, as propriedades de maior interesse são a combustibilidade, a inflamabilidade e as condições de propagação superficial da chama. Só sobre estas propriedades, a A. S. T. M. prescreve, por exemplo, neste momento 6 ensaios diferentes que podem ser conduzidos num laboratório normal. As únicas normas portuguesas que, de algum modo, se referem a este assunto são as NP 787, 790, 791 e 948, todas elas relativas a placas de materiais plásticos termoendurecidos, além da NP 116, sobre a determinação da condutibilidade térmica de materiais de construção.

Uma outra propriedade dos materiais que também interessa, embora esteja mais directamente ligada aos meios de salvação de pessoas, quer dos ocupantes, quer do próprio pessoal de segurança, é a natureza dos fumos e gases que se produzem na respectiva combustão.

A reacção ao fogo de um dado material pode ser traduzida por um único valor, designado por «índice de reacção ao fogo» segundo a terminologia introduzida na Bélgica pelo Prof. Herpol, e que representa uma média ponderada das várias propriedades, permitindo assim efectuar uma classificação relativa dos diferentes materiais.

Quanto aos ensaios dos elementos de construção, estes têm de ser conduzidos normalmente em fornalhas de grandes dimensões e são por isso em geral bastante onerosos. Fundamentalmente, trata-se de provocar um processo de aquecimento normalizado, que varia em geral de país para país, com pequenas diferenças. Por exemplo a curva normalizada ISO * (fig. 1) cuja expressão analítica é

$$T - T_0 = 345 \log_{10} (8\,t + 1) \qquad (1)$$

onde T é a temperatura corrente em °C no instante t em minutos e T_0 a temperatura inicial da fornalha, tem o andamento representado na fig. 1.

Com base neste processo de aquecimento, pretende-se verificar o tempo durante o qual o elemento estrutural em causa satisfaz às exigências funcionais para que foi concebido, as quais se podem considerar fundamentalmente duas:

— de compartimentação ou de corta-fogo — aquece-se, de acordo com a curva normalizada, uma das faces do elemento e verifica-se se a temperatura atingida pela outra face não excede determinados valores

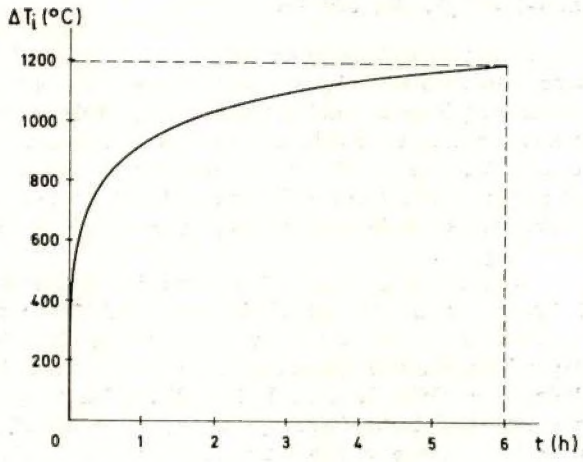


Fig. 1

Curva temperatura-tempo normalizada

(problema de isolamento térmico) ou não emite chamas ou gases inflamáveis (problema de estanqueidade). Esta exigência aplica-se por exemplo a paredes divisórias e a portas.

— de estabilidade — por exemplo de vigas, placas, ou estruturas completas, em que o aquecimento é feito sob carga e se tem em vista, ou assegurar que o material permanece em condições de desempenhar a sua função resistente, ou que não são atingidas deformações excessivas. Certos elementos, como é o caso dos pavimentos, podem exercer simultaneamente funções de compartimentação e de estabilidade. O parágrafo 3 desta comunicação ocupar-se-á particularmente do cálculo estrutural ao fogo, como já foi dito.

É natural que se encontrem entre nós dificuldades para a realização destes últimos ensaios. No entanto, parece que seria possível adaptar às nossas condições grande parte das conclusões já obtidas em países estrangeiros, confirmando-as por cálculos devidamente fundamentados, o que de si já daria uma razoável protecção às novas construções e permitiria até corrigir algumas das actuais sob esse ponto de vista.

Só depois de definidas todas as características indicadas será possível concretizar e quantificar devidamente o que hoje se designa nos nossos regulamentos por «materiais resistentes ao fogo», abrindo-se então a possibilidade de esta resistência ser encarada, não com carácter dicotómico de existir ou não existir, mas sim em vários graus, os quais se costumam traduzir em tempo (0,5 h — 1 h — 1,5 h — 2 h —, etc.). Um elemento cuja resistência ao fogo é de 0,5 h considera-se apenas «retardador»; se a resistência é de 1,5 h, diz-se que é um elemento «resistente ao fogo»; se finalmente é de 4 h ou superior, diz-se «altamente resistente ao fogo».

(*) Recomendação ISO R 834 F

2.2 — Protecção dos edifícios

Uma vez conhecidas as características de resistência ao fogo dos vários materiais e elementos estruturais, põe-se o problema das condições de segurança que devem ser exigidas em cada caso concreto. É evidente que estas são diferentes, por exemplo, entre um cinema e um edifício para habitação e diferentes ainda, neste último caso, se o edifício tiver 5 ou 20 pisos.

Ocupando-se o presente Congresso de edifícios de habitação, nem por isso será dispensável frisar a urgência que existe em levar por diante a classificação legal dos edifícios, de acordo com a sua finalidade, para efeito do risco de incêndio. Sabemos que algumas tentativas foram já feitas neste sentido, mas infelizmente o problema continua em aberto. Entretanto, não deixa de ser curioso recordar que está em vigor o disposto no art.º 141.º do R. G. E. U., segundo o qual «a nenhuma edificação ou parte de edificação poderá ser dada, mesmo temporariamente, aplicação diferente daquela para que foi autorizada, de que resulte maior risco de incêndio, sem que previamente sejam executadas as obras de defesa indispensáveis para garantia da segurança dos ocupantes do próprio prédio ou dos vizinhos». Ocioso será recordar a facilidade com que por exemplo um edifício destinado a habitação é transformado em escritório...

E, por outro lado, estabelece o mesmo R. G. E. U. no art.º 147.º que «todas as estruturas metálicas que suportam elementos de construção em edificações abrangidas pelo presente artigo serão eficazmente protegidas contra a acção do fogo por revestimentos de materiais isoladores com a necessária espessura». O que se deve entender aqui por «eficaz» e «necessário»?

Neste capítulo, a postura municipal de Lisboa de 23/10/74, já referida, procura adiantar um pouco mais que o R. G. E. U. pois, além de para os edifícios com 10 ou mais pisos referidos no art.º 159.º do mesmo, estabelece normas para algumas edificações de natureza especial, considerando como tal: caves, estacionamento de viaturas, e estabelecimentos recebendo público, tais como hotéis e estabelecimentos similares, estabelecimentos comerciais e industriais, edifícios de escritórios, etc. Todavia, por muito boa que seja a intenção da referida postura, a verdade é que as exigências que ali se fazem são ainda muito imperfeitas relativamente ao que se pode encontrar em regulamentos estrangeiros, permanecendo pois a necessidade urgente de uma regulamentação nacional neste ponto e mais uma vez aqui os investigadores no domínio do fogo vieram encontrar dificuldades de comparação.

A classificação dos edifícios para efeito do risco de incêndio põe em jogo diversas variáveis, a primeira das quais é a chamada *carga de incêndio* (designação já utilizada na indústria seguradora entre nós e que preferimos à carga calorífica, introduzida na postura camarária) a qual é definida como a quantidade de calor total que se pode libertar dos vários materiais combustíveis e em condições de ignição possível, por unidade de área em planta do compartimento em que se encontram. A postura municipal estabelece o valor de 25 Kg/m² de madeira, o que corresponde aproximadamente a 100 Mcal/m². O seu valor é todavia muito variável podendo ir para diferentes utilizações, de 10 Mcal/m² a 1000 Mcal/m² ou mais, de acordo com normas suíças recentes.

Por outro lado, na classificação interessam as maiores ou menores possibilidades de evacuação das pessoas (tenha-se presente o caso extremo de doentes em hospitais, de pessoas idosas, por exemplo) e de ataque ao incêndio (edifícios altos). Todos estes factores devem pois ser devidamente pesados.

Só depois de feita a classificação do edifício ou mesmo de cada uma das suas partes, poderá o técnico elaborar um projecto correcto do ponto de vista da protecção ao fogo, o qual, independentemente de determinadas características de natureza arquitectónica, (larguras mínimas, comunicações horizontais e verticais, meios de evacuação, etc.) e de protecção (detecção e/ou extinção automática), deverá incluir a comprovação de que os diferentes elementos de construção de cada compartimento satisfazem às exigências impostas pela finalidade de ocupação.

Estas exigências são, antes de mais, as relativas à compartimentação e, em seguida, à estabilidade. Quanto à função de compartimentação, devem as paredes ou pavimentos de compartimentação apresentar características de resistência corta-fogo adequadas, e analogamente as escadas, elevadores, comunicações horizontais, etc.

Assim, a protecção a conferir aos vários tipos de edifícios depende dos fins a que os mesmos se destinam, o que obrigará à publicação, ou de regulamento geral cobrindo os vários tipos (caso, por exemplo, do actual regulamento canadiano) ou de um regulamento para cada tipo. Sabemos que se pensou recentemente entre nós nesta última solução relativamente aos edifícios de grande altura, entendendo-se como tal os de altura superior a 30 m, e também quanto aos de média altura (porventura os de maior interesse para este Congresso), mas nenhum desses regulamentos viu ainda a luz do dia, o que aliás se compreende atendendo à inexistência de outras disposições legais como atrás referimos, em que eles se deveriam logicamente apoiar.

Aliás, no parecer dos autores, dever-se-ia fazer anteceder a saída de qualquer regulamento neste campo, de definição exacta dos principais termos relativos ao fogo e sua equivalência em línguas estrangeiras, por exemplo acrescentando esses termos ao actual Vocabulário da Teoria das Estruturas, o que poderia ser feito com relativa rapidez.

3 — ESTABILIDADE ESTRUTURAL PERANTE O FOGO

Até há relativamente pouco tempo, a protecção ao fogo de um dado edifício era traduzida em regulamentos estrangeiros pela resistência de compartimentação ao fogo em horas, de cada um dos seus elementos, como se descreveu atrás.

Modernamente assiste-se no entanto à tendência para ir mais além e fazer entrar também a resistência ao fogo no campo do cálculo estrutural (resistência de estabilidade).

O comportamento estrutural a elevadas temperaturas constituiu até há bem pouco tempo uma questão sobre a qual a termomecânica não se tinha debruçado embora houvesse já muitos elementos úteis disponíveis àcerca do comportamento dos materiais nessas condições, por exemplo através do projecto de caldeiras. Só mais recentemente se tem vindo a considerar este assunto, consequência de estudos teóricos e experimentais motivados pela constatação dos graves prejuízos causados pelo colapso de estruturas metálicas devido a incêndios.

Apesar do muito que ainda há a fazer no campo da investigação do comportamento estrutural ao fogo, podemos dizer que os estudos já efectuados conduziram a conclusões que constituem uma base válida para projecto.

Com o aumento de temperatura que se verifica durante um incêndio, a tensão de cedência do aço e o seu módulo de elasticidade diminuem, pelo que uma estrutura inicialmente concebida para resistir a determinadas cargas pode vir a entrar em colapso para cargas bastante inferiores, quando a temperatura aumenta.

Simplificadamente, pode dizer-se que, entre 300 e 600 °C, por cada grau de aumento de temperatura a tensão de cedência do aço sofre uma diminuição de 0,11 % e o módulo de elasticidade de 0,078 % em relação aos respectivos valores à temperatura normal.

É fundamental assim o conhecimento dos processos de desenvolvimento do incêndio e de transmissão de calor para os elementos estruturais, tendo em vista a avaliação do tempo ao fim do qual se pode esperar o colapso global ou local da estrutura.

A duração de um incêndio depende de variados factores tais como a combustibilidade dos materiais presentes, sua disposição relativa, maior ou menor acesso de ar ao local e sobretudo da *carga de incêndio* já anteriormente definida.

Cada elemento estrutural e a própria estrutura, além de serem concebidos para resistir ao conjunto de solicitações até agora normalmente consideradas, devem também apresentar uma resistência de estabilidade ao fogo, como atrás foi definida, superior à duração do incêndio no decurso de um ensaio de incêndio normalizado.

O incêndio aparece pois como mais uma solicitação a ter em conta na fase do projecto.

Nos países em que os estudos de comportamento estrutural ao fogo estão mais avançados, os elementos estruturais são efectivamente catalogados, do ponto de vista de resistência ao fogo, mediante ensaios de incêndio normalizados realizados em grandes fornalhas. Como já se disse é enorme o custo não só das instalações para estes ensaios como do próprio ensaio em si. Esta a razão fundamental por que estão a ser orientados esforços no sentido de um maior aprofundamento dos conhecimentos teóricos com vista ao estabelecimento de leis de simples aplicação prática.

Por outro lado, a exploração das técnicas de ensaio em modelo reduzido, com que por exemplo o CEMUL se preocupa neste momento, e sua aplicação ao caso presente poderá vir a ser outra via a seguir.

De qualquer forma, quer se siga uma via analítica, quer se enverede pelo caminho experimental, e dada a grande aleatoriedade quanto às condições de desenvolvimento de um incêndio real, impôs-se a definição da curva de incêndio normalizada também já anteriormente referida.

É de acordo com esta curva que os ensaios experimentais são realizados e que, com base nas leis de transmissão de calor, se estabelecem as leis de aquecimento dos elementos estruturais ficando-se assim apto a saber qual é, em cada instante, a temperatura em cada ponto desses elementos o que, combinado com o conhecimento do comportamento do aço a altas temperaturas, permite fazer a previsão do tempo ao fim do qual se dará o colapso.

A transmissão de calor de um ambiente de incêndio para os elementos resistentes, protegidos ou não, é feita por radiação e convecção com especial preponderância da primeira, sempre que as chamas sejam particularmente luminosas. Daí que um dos processos de retardar a subida de temperatura nos elementos estruturais seja interpor, entre as chamas e estes, anteparos opacos. Se o elemento é revestido com qualquer material de protecção, intervirá também o processo de transmissão de calor por condução até ao núcleo de aço e a melhoria das características de resistência térmica dos materiais utilizados em protecção ao fogo retardará o colapso.

Dos estudos já feitos concluiu-se que a taxa ΔT_i de aumento de temperatura dos elementos estruturais dependia da espessura e condutividade térmica da protecção, do calor específico e do chamado *factor de forma* do elemento protegido (razão entre a área lateral que pode receber calor e o peso por unidade de comprimento) e da diferença de temperatura entre o incêndio e o elemento, de acordo com a expressão:

$$\Delta T_i = \frac{KU}{Gc} (T_m - T_i) \cdot \Delta t \qquad (2)$$

onde

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_t} + \frac{d}{\lambda}}$$ — coeficiente global de transmissão térmica da camada de protecção. (kcal/m² . h. °C)

α_t — coeficiente total de transmissão térmica radiação mais convecção (kcal/m² . h. °C)

d — espessura da camada de protecção (m)

λ — condutividade térmica da camada de protecção. (kcal/m . h. °C)

U — área da superfície interior da protecção por unidade de comprimento do elemento (m²/m)

G — peso do elemento por unidade de comprimento (kgf/m)

c — calor específico do elemento protegido (kcal/ /°C. kg)

T_m — temperatura média de incêndio (°C)

T_1 — temperatura do elemento (°C)

Deve dizer-se que esta taxa de aumento de temperatura é função implícita do tempo já que as características físicas quer da protecção quer do elemento protegido variam com a temperatura e portanto ao longo do tempo.

Acrescente-se ainda que esta taxa depende também do teor de humidade do material de protecção visto que parte do calor que transita através deste é utilizado na evaporação da água. Vê-se que a taxa de elevação de temperatura é tanto menor quanto mais compacta for a secção transversal do elemento.

A maioria dos estudos feitos até hoje baseia-se na suposição de que a temperatura nos elementos de aço assume o mesmo valor em todos os pontos das respectivas secções transversais. Isto corresponde a uma simplificação do problema, aceitável como primeira iteração e no entanto suficientemente válida para peças com factor de forma de valor elevado. Tomando como exemplo o caso de um pilar pouco esbelto submetido a compressão uniforme, podemos dizer que quando o esforço normal atinge o valor $N = \Omega\ \sigma_f$ (Ω — área da secção transversal; σ_f — tensão de cedência à temperatura normal) todos os pontos de uma secção e todas as secções entram em cedência. Se teoricamente é isto que se passa à temperatura normal, já o mesmo se não pode dizer se o pilar estiver num ambiente de incêndio. Na realidade, os pontos da secção transversal do pilar que se encontram mais perto da superfície exterior estarão em cada instante a temperaturas maiores que aqueles que se encontram mais afastados. Uma vez que a tensão de cedência diminui com o aumento de temperatura, os pontos da secção transversal que primeiro entrarão em cedência serão aqueles que se encontram a mais altas temperaturas, os mais próximos da superfície exterior. Todavia não esqueçamos que o próprio módulo de elasticidade diminui com a temperatura e que por esse motivo a análise da distribuição de tensões na secção não pode ser feita de forma tão simplista. O próprio comportamento do conjunto da estrutura é influenciado, como não podia deixar de ser, por esta dupla dependência do módulo de elasticidade e tensão de cedência com a temperatura.

Actualmente existem já algumas tentativas de determinação do campo de temperaturas nos pontos da secção transversal de pilares, recorrendo sobretudo às possibilidades que nos são oferecidas pelo cálculo automático.

Deve notar-se que ainda hoje não existe possibilidade de falar em «cálculo estrutural ao fogo», em toda a generalidade, pois que apenas se têm considerado, ou elementos estruturais isolados (pilares e vigas principalmente) ou estruturas muito simples, pelo que os progressos a fazer neste campo serão ainda bastantes.

As investigações já conduzidas mesmo para estruturas reticuladas revelam que, atendendo à citada variação das características mecânicas com a temperatura, o problema da instabilidade ganha especial importância neste tipo de cálculo estrutural.

Por fim, interessa pôr em evidência que a análise do comportamento estrutural ao fogo não dispensa, como é óbvio, a verificação de resistência à compartimentação, posto que as respectivas finalidades são independentes.

Além disso, este mesmo cálculo poderá levantar muitas outras questões, que têm o seu paralelo no cálculo para as solicitações correntes, como por exemplo: combinações consideradas mais desfavoráveis, fluência, regime de arrefecimento, etc.

4 — ASPECTOS ECONÓMICOS

Por constatação quase diária verificamos como são elevados os prejuízos causados pelos incêndios. Estes prejuízos são devidos, de um modo geral, à perda de bens móveis e imóveis ou impossibilidade da sua utilização e à perda de vidas ou incapacidade humana.

Num balanço económico do problema dos incêndios, quer ao nível de uma empresa, quer ao nível de um país, as perdas ou prejuízos são todavia apenas uma parcela dos custos totais envolvidos. A outra, que poderemos designar por «gastos» inclui o custo das medidas, de protecção, prevenção e combate, os seguros e as importâncias investidas em investigação e desenvolvimento específico deste campo.

Estimam-se as perdas aproximadamente em 30 a 40 % do custo total envolvido nos incêndios com base em elementos relativos ao Canadá, Holanda, Reino Unido e Estados Unidos. Por seu turno, aquele custo total representa em diversos países 1 % do produto nacional bruto.

Como se disse na introdução, a protecção da vida dos ocupantes é considerada de importância primordial, sendo no entanto impossível construir prédios com 100 % de segurança. Para se poder avaliar quanto deve ser gasto em protecção da vida humana, é necessária uma quantificação monetária para essa vida, por maior relutância que se possa sentir em fazê-lo. Existem assim vários critérios para fazer esta quantificação baseados na produção e consumo. Conhece-se uma tentativa feita por ABRAHAM e THÉDIE em 1957 para uso na prevenção de acidentes de trânsito. Os valores utilizados são função da idade e sexo do indivíduo.

As estatísticas mostram que a maioria dos prejuízos é causada por um número reduzido de incêndios. Assim, no Reino Unido e Canadá verificou-se que apenas 0,5 % dos incêndios foram responsáveis

por 50 % do total dos prejuízos. Este número sugere que se intensifique o estudo da prevenção contra a ocorrência de grandes incêndios.

Uma consequência das perdas causadas por incêndios é, como atrás se disse, a impossibilidade de uso ulterior de instalações e equipamento, por um período mais ou menos longo. Embora ao nível dum país estes efeitos não tenham influência económica significativa, eles podem revelar-se gravíssimos numa empresa, se não estiverem adequadamente cobertos pelo seguro. A parte correspondente a meios de extinção é devida principalmente a instalações, equipamento e salários dos bombeiros. A avaliação destes gastos nos Estados Unidos, Canadá e Reino Unido conduziu a valores da mesma ordem de grandeza das perdas directas de propriedade, que por seu turno representam 30 % do custo total de incêndio. A prevenção contra a ocorrência de fogo e a protecção das pessoas e bens são os principais meios de evitar perdas. Estas precauções implicam a incorporação de medidas de segurança nos edifícios, medidas essas que devem ser especificadas em regulamentos, impondo-se que existam igualmente entidades que verifiquem a aplicação dos mesmos. Estas duas operações, como é evidente, vão tornar mais dispendioso o custo dos edifícios, tendo estes gastos um peso de 10 % sobre o custo total de incêndio.

O seguro de incêndio é basicamente dirigido à protecção monetária dos bens caso sejam destruídos ou danificados por incêndio, não cobrindo a perda de vidas humanas.

Em relação ao nosso país existem dados sobre o valor total de indemnizações pagas pelos seguros, o que todavia representa apenas uma parte do total dos danos verificados, em virtude de, por um lado, o seguro de incêndio ser feito com base no valor que o segurado deseja atribuir ao bem a segurar, que tende naturalmente a ser reduzido, e, por outro lado, muitos dos incêndios atingirem bens não segurados.

O Instituto Nacional de Seguros forneceu-nos o quadro contido na presente página, do qual constam os valores em contos das indemnizações liquidadas pelas companhias em seguro directo (excepto matas, florestas, searas e outras terras de cultura), sendo provisórios ainda os valores relativos a 1975 e 1976.

Por ele se vêem as oscilações existentes, sendo interessante notar por exemplo que o máximo foi atingido em 1975 (604 751 contos), valor esse que desceu em 1976 para 461 597 contos importância inferior a 1974.

Por outro lado, de acordo com elementos obtidos junto do Instituto Nacional de Estatística, sabe-se que no ano de 1976, os bombeiros portugueses participaram no combate a 17 217 incêndios, sendo destes 8 812 em matas e florestas, 2 731 em casas de habitação, 1 185 em searas e outras terras de cultura, 730 em fábricas e oficinas, 353 em instalações de convivência, 162 em bairros de lata, 44 em escritórios e 3 200 outros.

QUADRO (contos)

	Exercício	Reajustamento
1965	138 982	
1966	155 090	−672
1967	130 821	−1 551
1968	144 320	−248
1969	190 898	−1 515
1970	222 681	−3 389
1971	252 903	−6 695
1972	344 099	−4 387
1973	367 001	−14 828
1974	507 745	−22 652
1975	604 751	
1976	461 597	

Estes números não correspondem aos valores das indemnizações mencionadas, pelas razões já acima apontadas. Os valores do número de incêndios não se prestam a uma análise exaustiva, porque não é conhecida a causa dos incêndios, como também não é conhecido o montante de perdas que cada uma das parcelas ocasionou. Este facto torna impossível apurar convenientemente a situação relativamente à habitação, como interessaria a este Congresso.

Em cada caso concreto, o estudo das medidas de prevenção é justificado através de um balanço entre os benefícios monetários que possam advir pela sua aplicação e as perdas esperadas. Como é evidente, só se os gastos efectuados em prevenção reduzirem substancialmente as perdas, é que estes são aconselháveis.

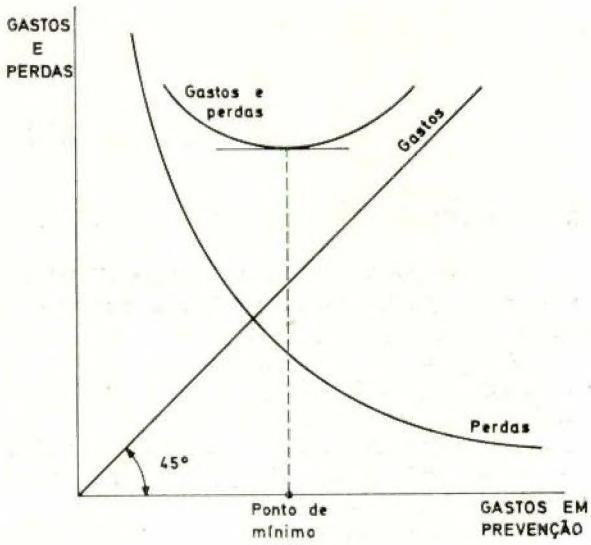


Fig. 2
Optimização de gastos e perdas

A optimização dos gastos em prevenção contra incêndio pode ser feita através da determinação do ponto de mínimo que representa a soma dos gastos

com as perdas esperadas, quando executada essa protecção (Fig. 2).

5 — CONCLUSÕES

Como se disse na introdução, o objectivo da presente comunicação é essencialmente sensibilizar todas as pessoas e entidades que têm algo a ver com o problema dos incêndios, no sentido de realizarem um esforço comum para que o referido problema receba entre nós a atenção de que tanto carece.

Os esforços a desenvolver são na realidade em grande número e abrangem diversos campos, impondo-se uma coordenação. Tanto quanto é do conhecimento dos autores, tal tarefa encontra-se nos planos de actividade do Serviço Nacional de Protecção Civil, actualmente em fase de instalação, sendo justo referir o apoio que, nesta fase, tem sido prestado por vários serviços, em particular o Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Atendendo à antecedência com que a comunicação é apresentada relativamente à data do Congresso, é mesmo possível que grande número dos problemas aqui referidos tenham já entrado em fase de solução por iniciativa do Serviço Nacional de Protecção Civil, o que os autores veriam com a maior satisfação.

Neste aspecto, nunca é demais insistir no mérito da actividade já desenvolvida por diversas entidades, preponderando, como é natural, a acção dos bombeiros, quer sapadores, quer voluntários, não só na extinção (actividade por que normalmente são evocados), mas também na prevenção e fiscalização.

Muito recentemente, por exemplo, no Colóquio sobre Investigação e Desenvolvimento com Projecção no Ensino Superior Militar promovido em Lisboa pela Academia Militar de 14 a 16 de Junho do corrente ano, foi tornada pública a existência na Armada da chamada Escola de Limitação de Avarias, a qual dispõe, entre outras instalações, de um Parque de Incêndios. Esta Escola tem funções de ensino e funções técnicas, de estudos, projectos e especificações de material, tendo já elaborado cerca de 50 estudos de protecção de edifícios ligados ao Ministério da Marinha.

Assim se confirma que grande parte do esforço a desenvolver será de coordenação de actividades já existentes, embora estas tenham sido conduzidas, do ponto de vista do País, de forma desconexa.

Como em todos os campos que tocam directamente a actividade humana, há necessidade de intervenções a curto, médio e longo prazo. A actividade de investigação a que os autores se dedicam pertence ao último tipo, mas ela necessita de ser acompanhada pelas restantes, para que a comunidade possa na realidade beneficiar dum trabalho conjunto de renovação permanente, que permita optimizar o binómio segurança-economia.

O presente trabalho integra-se nas actividades de investigação da Linha 3 do CEMUL — Centro de Mecânica e Materiais das Universidades de Lisboa (INIC).

NOTICIÁRIO

● Produção de energia eléctrica em 1977

A produção hidráulica de energia eléctrica em Portugal registou em 1977 um aumento de 107,5 por cento em relação a 1976. Tal resultou de o ano passado ter sido muito mais chuvoso do que o anterior, em que os efeitos de prolongada seca obrigaram a restrições nos consumos.

Assim, enquanto a produção hidráulica, que é a base do sistema electroprodutor da EDP (Electricidade de Portugal), subiu de 4733 gigawatts/hora para 9819 GWH, a produção térmica, que completa as necessidades de consumo, desceu de 4525 GWH para 3059 GWH, o que significa menos 32,4 por cento e uma baixa de consumo dos combustíveis utilizados nas três centrais térmicas existentes no País: Tapada do Outeiro, alimentada a carvão (menos 36,7 por cento); Carregado, que trabalha com fuel-óleo (menos 29,7 por cento); Alto de Mira, que funciona a gasóleo (menos 95,5 por cento).

Por outro lado, em 1976 houve necessidade de importar 1845 GWH, ao passo que em 1977 se exportaram 927 GWH.

Quanto ao consumo de energia, este subiu de 10 865 GWH em 1976 para 12 312 GWH em 1977, ou seja mais 13,3 por cento, o que é atribuído, nomeadamente, a um acréscimo das actividades industriais.

Entretanto, segundo informa também a EDP, em 31 de Dezembro último o armazenamento de água nas albufeiras era de 84,2 por cento da capacidade destas, tendo na semana de 1 a 7 do corrente mês as centrais hidroeléctricas produzido 304,7 GWH e as térmicas 26,9 GWH.

(Informação ANOP)

NÚMERO 445/446 DEZEMBRO 1977/JANEIRO 1978 ANO LII/LIII VOLUME XXXIX

C. D. U. 624.07[012.4]8

As ligações em estruturas prefabricadas de betão[1]

S. POMPEU DOS SANTOS (2)

RESUMO

A prefabricação das estruturas dos edifícios implica a necessidade de executar em obra as ligações entre os elementos prefabricados. A concepção, projecto e execução das ligações envolve a resolução de certas questões específicas normalmente não contempladas na regulamentação aplicável às estruturas de betão armado e (ou) pré-esforçado ou à estrutura metálica.

Neste documento abordam-se as ligações entre as peças prefabricadas das estruturas reticuladas de betão, sob o ponto de vista das suas exigências, nomeadamente de segurança estrutural, de durabilidade, de montagem, etc., procurando-se apresentar os modos de como essas exigências poderão ser satisfeitas. Apresenta-se ainda uma classificação de ligações de acordo com vários parâmetros, fazem-se algumas considerações sobre a concepção e execução de alguns tipos de ligações, apresentam-se alguns exemplos de soluções realizadas por processos diversos e finalmente faz-se a apresentação dum programa de estudos a desenvolver no âmbito deste tema.

SUMMARY

Precast building structures demand that connections between precast elements be made on the job. Design, project and production of connections require the resolution of certain specific problems, which are not usually envisaged in regulations for reinforced and prestressed concrete structurers and steel structures.

In this paper connections between precast elements of concrete framed structures are dealt with from the point of view of such requirements as structural safety, durability and handling, in order to show how these requirements may be fulfilled. A classification of connections according to some parameters is also presented and some considerations are made about design and execution of some types of connections. Several examples of connections made by different methods are given. Finally the author presents a programme of studies to be undertaken within this scope.

1 — INTRODUÇÃO

A moldagem em obra de estruturas de betão armado permite obter estruturas para as quais é possível, através da introdução de certas hipóteses, formular modelos de comportamento relativamente simples, que permitem o seu dimensionamento e a verificação da sua segurança.

Desde há alguns anos vêm sendo realizadas estruturas de betão constituídas por elementos prefabricados, isto é, realizados fora do local que vão ocupar na construção, o que implica a necessidade de executar ligações entre esses elementos, as quais são realizadas em condições (local, data, etc.) diferentes daquelas em que os referidos elementos foram executados.

A concepção, projecto e execução das ligações levanta, como se compreende, um certo número de questões, algumas ainda não completamente resolvidas.

Do ponto de vista estrutural as ligações são pontos singulares da estrutura prefabricada em relação aos quais haverá que saber, por um lado, em que condições se pode garantir a sua capacidade resistente para transmitir os esforços nelas instalados e, por outro lado, a influência das suas características de deformalidade (nomeadamente a sua ductilidade) no comportamento global da estrutura prefabricada.

A concepção e execução de ligações envolve ainda outras questões específicas, nomeadamente os

(1) A presente comunicação apoia-se em estudos realizados no âmbito do Plano de Edifícios desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

(2) Engenheiro estagiário para especialista da Divisão de Processos de Construção, Serviço de Edifícios, L. N. E. C. — Lisboa.

Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

processos e técnicas de montagem dos elementos prefabricados, problemas de durabilidade e de protecção contra o fogo, problemas de aspecto, e finalmente, como consequência, a questão da economia.

Neste documento abordam-se as ligações entre peças prefabricadas de betão, essencialmente das estruturas reticuladas (ligações entre peças lineares), sob o ponto de vista das suas exigências, procurando-se apresentar a maneira como essas exigências poderão ser satisfeitas.

O documento inicia-se por uma proposta de sistematização das ligações, classificadas em função de vários parâmetros. Faz-se depois uma análise detalhada das exigências das ligações, com especial ênfase para as exigências de segurança estrutural. Seguidamente fazem-se algumas considerações sobre a concepção e execução de ligações e apresentam-se alguns exemplos típicos de ligações realizadas com soluções diferentes. Finalmente faz-se referência ao programa de estudos a realizar para caracterização do comportamento mecânico de ligações e da segurança das estruturas reticuladas prefabricadas.

2 — TIPOS DE LIGAÇÕES

A terminologia no campo das ligações de peças prefabricadas de betão não é muito clara, havendo uma certa confusão entre algumas designações nomeadamente entre as de *ligação* e de *junta*. Por um lado há quem distinga ligações de juntas, considerando que as primeiras são elementos estruturais, isto é, mecanismos capazes de transmitir esforços ou tensões, e as juntas mecanismos que os dissipam. Nesta perspectiva é considerada ligação tanto o contacto entre elementos lineares (contacto pontual) como entre elementos planos (contacto linear). Do outro lado considera-se ligação o contacto (estrutural) entre peças lineares, chamando junta ao contacto entre peças laminares quer seja estrutural ou não. No que vai seguir-se tratar-se-á apenas de ligações, ou seja, de acordo com a segunda classificação, de contactos pontuais entre peças lineares.

Quanto à classificação das ligações também não há unanimidade, aparecendo em publicações especializadas [1], [2], [3], [4], classificações de ligações, diferindo bastante entre si, sendo por vezes feitas em função de parâmetros diferentes. Deste modo parece aconselhável que as ligações sejam classificadas não em função dum único parâmetro mas de vários: quanto ao processo de execução, quanto ao tipo de comportamento mecânico, quanto ao tipo de esforços que transmitem e quanto ao tipo de elementos ligados.

a) *quanto ao processo de execução*

São realizadas ligações por muitos processos; destacam-se os seguintes:

— *ligações de gravidade,* mobilizando o atrito induzido pelas forças de gravidade, entre elementos;
— *ligações aparafusadas,* ligando os elementos através de parafusos; nalguns casos os elementos estão protegidos por chapas metálicas dispostos nas suas extremidades;
— *ligações soldadas,* soldando chapas ou perfis metálicos dispostos nas extremidades dos elementos a ligar;
— *ligações pré-esforçadas,* aplicando um pré-esforço aos elementos prefabricados através da secção em que se realiza a ligação;
— *ligações de continuidade betonadas em obra,* betonando na obra a zona entre peças em que se realiza a continuidade das armaduras a qual se pode obter por vários processos (soldadura, sobreposição, etc.);
— *ligações coladas,* normalmente com resinas epoxi, que transmitem os esforços na ligação a qual é completada normalmente com a aplicação de pré-esforço.

Mais adiante será feita uma análise mais detalhada ao tratar de concepção e execução de ligações.

b) *quanto ao comportamento mecânico (à flexão)*

O lugar de destaque desempenhado pela flexão no comportamento das estruturas reticuladas, e consequentemente o comportamento das ligações quando submetidas a esse tipo de esforços, tem levado vários autores a caracterizar as ligações sob este ponto de vista. Deste modo, quanto ao comportamento à flexão as ligações são designadas por:

— ligações articuladas;
— ligações de continuidade total (rígidas);
— ligações de continuidade parcial (semi-rígidas).

As ligações articuladas são as que, podendo transmitir outros tipos de esforços, não têm capacidade para transmitir momentos flectores. Na construção de edifícios são pouco utilizadas pois são extremamente caras, necessitando de aparelhos de apoio semelhantes aos empregues em pontes (Fig. 1). Na prática são adoptadas por vezes soluções de ligações apelidadass de ligações articuladas que na realidade o não são rigorosamente, já que existem sempre constrangimentos que impedem a livre rotação das extremidades dos elementos ligados (Fig. 2).

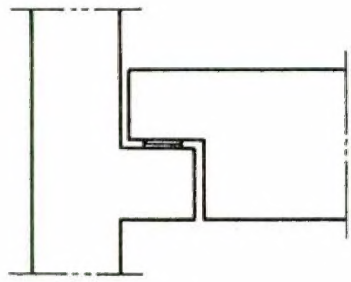


Fig. 1
Ligação articulada

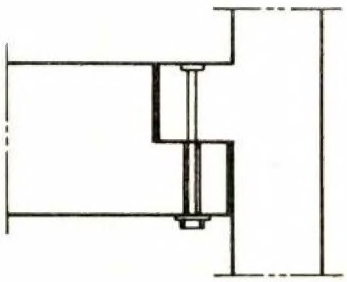


Fig. 2
Ligação de articulação imperfeita

As ligações de continuidade total são aquelas que, tendo sido projectadas de acordo com as regras do betão armado e pré-esforçado e da estrutura metálica, têm capacidade resistente pelo menos igual à das correspondentes secções da estrutura moldada em obra.

As ligações de continuidade parcial são aquelas que apresentam um certo grau de monolitismo, mas em qualquer caso inferior ao das ligações de continuidade total. Para as ligações deste tipo, que são as mais numerosas, haverá que elaborar modelos de comportamento mecânico que permitam determinar analiticamente a respectiva capacidade resistente.

c) *quanto ao tipo de esforços transmitidos*

Esta classificação é referida, entre outros, em recente publicação do C. E. B. — Comité Euro-International du Béton — [5], de acordo com a função desempenhada pela ligação, podendo corresponder a cada caso mais que uma designação:

— ligações de compressão;
— ligações de tracção;
— ligações de flexão;
— ligações de corte;

d) *quanto ao tipo de elementos ligados*

— ligações pilar-fundação;
— ligações pilar-pilar;
— ligações pilar-viga;
— ligações viga-viga;
— ligações viga-laje.

Nesta sistemática poderão incluir-se também as *peças compostas,* realizadas com o concurso duma parte prefabricada e de outra moldada em obra, associadas.

3 — EXIGÊNCIAS DAS LIGAÇÕES

3.1 — Generalidades

As ligações, tal como os outros órgãos duma estrutura prefabricada, são concebidas, projectadas e executadas dando satisfação a um conjunto de exigências; tratando-se de ligações de elementos estruturais, pode afirmar-se que tais exigências são iminentemente exigências de segurança. No entanto, em face da singularidade das ligações, a sua concepção, projecto e execução deverão dar satisfação não só a exigências de segurança como também a exigências de durabilidade, de montagem, de aspecto e de economia.

As exigências de segurança serão, contudo, as mais importantes e merecem, por isso mesmo, uma atenção muito especial. Entre as exigências de segurança referem-se as exigências de segurança estrutural e as de protecção contra o fogo. Das exigências de durabilidade destaca-se a exigência de conservação das propriedades mecânicas dos materiais.

3.2 — Segurança estrutural

3.2.1 — Introdução

A segurança estrutural das ligações está intimamente relacionada com a questão mais geral da segurança estrutural das construções prefabricadas. Mas, sendo as ligações dos elementos prefabricados de betão realizadas com o concurso do betão armado e pré-esforçado e de elementos metálicos, não será a aplicação das disposições regulamentares aplicáveis a estes tipos de estruturas suficiente para garantir a segurança das ligações e, por inerência, a da estrutura prefabricada?

Em princípio seria desejável que assim fosse mas, de facto, a regulamentação hoje existente no nosso país não contempla explicitamente as construções prefabricadas de betão as quais, de acordo com o art. 17 do R. G. E. U. — *Regulamento Geral das Edificações Urbanas* — deverão ser submetidas a prévia apreciação pelo L. N. E. C. — Laboratório Nacional de Engenharia Civil, antes da sua aplicação.

A análise da regulamentação relativa às estruturas de betão armado de países com grande tradição de uso de construções prefabricadas pesadas, revela no entanto, que a questão da concepção e da segurança das ligações entre os elementos prefabricados não é tratada de modo unânime.

Em Inglaterra, o C. P. 110 — *Code of Practice for the Structural Use of Concrete* [6] inclui um capítulo relativo à construção prefabricada, no qual refere explicitamente a questão das suas ligações. Estas são abordadas sob o ponto de vista das exigências a que devem dar satisfação, as quais incluem, além das formuladas para as estruturas moldadas em obra, a exigência de estabilidade durante a montagem. Estabelece ainda que o dimensionamento das ligações deverá ser feito, sempre que possível, de

acordo com as regras gerais do betão armado e pré-esforçado ou da estrutura metálica, devendo, onde tais regras não forem aplicáveis, a eficiência das ligações ser provada por ensaios. Inclui ainda algumas disposições construtivas para garantir a eficiência das ligações.

Na Alemanha e na França, a Norma DIN 1045 — *Construcción de Hormigon y Hormigon Armado* (tradução espanhola) [7] e as *Règles CCBA 68 — Règles Techniques de Conception et de Calcul des Ouvrages et Constructions en Beton Armé* [8], respectivamente, não fazem qualquer referência particular às ligações das peças das estruturas prefabricadas, mormente aos aspectos de segurança.

Nos E. U. A., em que a regulamentação no domínio do betão armado e pré-esforçado funciona de modo um pouco diferente que nos países europeus, são de salientar publicações de três organismos de âmbito federal relativas às ligações das peças prefabricadas de betão: o A. C. I. — American Concrete Institute, o A. S. C. E. — American Society of Civil Engineers e o P. C. I. — Prestressed Concrete Institute.

Os primeiros publicaram conjuntamente o *ACI — ASCE Committee 512 — Suggested Design of Joints and Connections in Precast Structural Concrete* [9], aplicável às ligações entre elementos prefabricados de betão e (ou) metálicos. Este documento refere os vários processos de execução de ligações incluídos no seu âmbito, e apresenta a formulação teórica do comportamento das várias soluções de ligações quando transmitem os vários esforços como base para o dimensionamento. Estabelece também que, em caso de dúvida quanto à determinação da capacidade resistente duma ligação, esta deverá ser provada através de ensaios. No que se refere à segurança, este documento tem já em conta a singularidade das ligações, impondo que a segurança da estrutura prefabricada deve ser condicionada pela resistência dos seus elementos e nunca pela das suas ligações. Deste modo recomenda dotar a ligações duma capacidade de resistência última pelo menos 10 % superior à exigida aos elementos ligados, podendo esta recomendação ser satisfeita proporcionando à ligação uma resistência 1,1 vezes a capacidade de resistência última exigida pelo ACI 318 — *Building Code Requirements for Reinforced Concrete.*

O P. C. I. aborda as ligações entre peças prefabricadas, primeiro no *PCI DESIGN HANDBOOK — Prescast and Prestressed Concrete* [10] e depois no *PCI Manual on Design of Connections for Precast Prestressed Concrete* [11], os quais se aplicam contudo tanto ao betão pré-esforçado como ao betão armado. A segunda publicação constitui um autêntico manual sobre ligações fazendo considerações gerais quanto ao projecto e execução de ligações, apresentando a formulação teórica do comportamento mecânico dos vários elementos constituintes das ligações, algumas soluções típicas de ligações, bem como ábacos e tabelas de dimensionamento directo de ligações. No que se refere propriamente à segurança, exige também às ligações uma segurança superior à exigida aos elementos, entre outras razões, para ter em conta a diminuição da capacidade resistente devida a eventuais defeitos de execução e alterações nos valores dos esforços solicitantes, recomendando um coeficiente de segurança adicional de 1,33. Admite contudo a redução deste valor se o projectista o entender excessivo em cada caso particular.

Embora sem carácter de regulamentação, referem-se ainda outros trabalhos de interesse sobre segurança de ligações, nomeadamente o de F. DERBEZ e J. MARTIN [12] por um lado, e os de R. H. WOOD [13] e V. PECTU [14] por outro.

Os primeiros apresentam uma formulação semelhante à das publicações norte-americanas já referidas, fazendo idealizações do comportamento mecânico de soluções típicas de ligações, exigindo também coeficientes de segurança adicionais no seu dimensionamento. Como particularidade, fazem depender o valor do coeficiente de segurança adicional, da ductilidade de cada ligação. Para resolver a dificuldade de quantificação da ductilidade das ligações, sugerem certos valores para os coeficientes de segurança em função do tipo de ligação (articulada, contínua), do tipo de cargas actuantes (todas, verticais, horizontais) e do tipo de cálculo efectuado (elástico, plástico). Por exemplo, no caso de ligações de continuidade para a actuação de todas as cargas e em cálculo elástico, o coeficiente proposto é de 1,3.

WOOD e PECTU por seu lado, tendo em conta as presumíveis particularidades de comportamento mecânico das ligações, principalmente à flexão, e a influência decisiva das deformações por flexão na distribuição dos esforços nas estruturas hiperstáticas, abordam a questão do comportamento das ligações e das estruturas prefabricadas por outro prisma, recorrendo às teorias de comportamento plástico das estruturas para o cálculo dos esforços. Partem do princípio de que as ligações apresentam, em geral, características de resistência e de deformabilidade diferentes das das secções dos elementos prefabricados pelo que, se estiverem localizadas em secções críticas da estrutura (extremidades de barras, p. e.), serão as secções em que primeiro se atingem os momentos de plastificação, dando lugar à formação de rótulas plásticas. Deste modo, quando, com o incremento das acções, os momentos flectores nas ligações atingirem os valores dos respectivos momentos de plastificação, aqueles mantêm-se constantes, passando o acréscimo das acções a ser absorvido por incremento dos esforços nas outras secções críticas.

Esta formulação, se bem que tenha em conta as características particulares de comportamento das ligações, apresenta, no entanto, vários inconvenientes. Por um lado não se ajusta bem às hipóteses feitas quanto ao comportamento das secções das estruturas de betão armado, conduzindo em geral a valores dos esforços de rotura para os quais a estrutura não terá capacidade de redistribuição de acordo com os critérios habituais. Por outro lado o método de cálculo plástico não permite acompanhar a evolução do com-

portamento da estrutura (deformação e distribuição de esforços) à medida que aumenta a intensidade das solicitações, permitindo apenas definir os esforços e a configuração de rotura da estrutura.

Será desejável ainda que o comportamento das ligações entre os elementos prefabricados e a sua influência na segurança da estrutura prefabricada possam ser formulados nos mesmos termos adoptados para as estruturas em geral, e de betão armado e pré-esforçado em particular, e que a verificação da segurança da estrutura seja feita de acordo com os «code-format» aplicáveis às estruturas de betão.

Assim, de acordo com recentes documentos do CEB — *Common Unified Rules for Diffrent Types of Construction and Material* [15] *e Code-modèle pour les Structures en Beton (3.º projet)* [5], e do LNEC — *Projecto de Regulamento de Segurança e Solicitações em Estruturas de Edifícios e Pontes* (Doc. 6, 7) [16] e Projecto de Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (Doc. 1) [17], a verificação da segurança das estruturas de betão e, consequentemente, a das estruturas prefabricadas incluindo a das suas ligações, deverá ser efectuada em relação aos estados limites; estados limites últimos (resistência, colapso progressivo) e estados limites de utilização. As verificações em relação aos estados limites últimos, em particular o estado limite último de resistência, serão todavia aquelas em que as particularidades das ligações assumem especial relevância.

3.2.2 — Segurança em relação ao estado limite último de resistência

De acordo com a formulação expressa nos documentos atrás referidos a verificação da segurança das secções de betão em relação ao estado limite último de resistência deverá ser efectuada em termos de esforços, comparando os esforços resistentes de cálculo (Rd) com os esforços solicitantes de cálculo (Sd) através da relação:

$$\frac{Rd}{Sd} \geqslant \gamma_n$$

em que γ_n é um coeficiente de segurança adicional, para ter em conta as incertezas do modelo.

Na determinação dos valores de Rd, Sd e γ_n serão então tidas em conta as características de comportamento mecânico das ligações (capacidade resistente, deformabilidade) e a sua influência no comportamento da estrutura prefabricada.

A determinação da capacidade resistente (valores dos esforços resistentes) duma ligação deverá ser feita, em princípio, de acordo com as teorias gerais do comportamento dos elementos de betão armado e pré-esforçado e dos elementos metálicos. No entanto, sempre que tais teorias não puderem ser aplicáveis directamente ou quando a sua aplicação suscite dúvidas, o dimensionamento da ligação deverá ser feito a partir dos resultados de ensaios apropriados que deverão permitir a elaboração dum modelo teórico de comportamento das ligações desse tipo. Faz-se notar todavia que, na elaboração do referido modelo de comportamento, deverão ser respeitadas as hipóteses assumidas relativamente ao comportamento do betão e do aço nas estruturas em geral.

Para a elaboração dos referidos modelos de comportamento de ligações poder-se-ão aproveitar resultados de ensaios realizados em organismos de investigação de reconhecida competência, bem como formulações já elaboradas, nomeadamente nas publicações referidas atrás [9], [10], [11], [12].

As eventuais incertezas do modelo formulado serão depois tidas em conta no valor do coeficiente de segurança adicional γ_n, o qual apresentará assim um valor normalmente superior a 1,0.

São muitos os estudos efectuados para caracterização do comportamento de ligações entre elementos prefabricados. Dos que se tem conhecimento referem-se, pelo seu interesse, os trabalhos de R. LAFRAUGH e D. MAGURA [18] sobre ligações pilar-fundação com chapas metálicas aparafusadas, J. SPIRA e R. B. SMITH [19] sobre ligações de continuidade betonadas em obra obtidas com diferentes soluções de emenda dos varões, e de R. W. BLAKELEY e R. PARK [20] sobre o comportamento sísmico de ligações pilar-viga pré-esforçadas.

A determinação dos esforços solicitantes das ligações será feita simultaneamente com os das restantes secções dos elementos prefabricados, tendo em conta as solicitações actuantes na estrutura e especificadas na regulamentação.

No caso de estruturas hiperstáticas, o cálculo dos esforços deverá ter em conta as características próprias de deformabilidade à flexão das ligações e a influência da sua não linearidade, nomeadamente na possibilidade de redistribuição de esforços quando calculados em regime linear e na resposta da estrutura quando sob a acção dos sismos. Para estudar estas influências será em princípio necessário conhecer os diagramas momentos-curvaturas para cada solução de ligação uma vez que os diagramas momentos-curvaturas das secções de betão armado estão já caracterizados no LNEC por V. MONTEIRO [21]. Estudos sobre o comportamento de estruturas de betão armado em regime não linear elaborados também no LNEC [22], e que serviram de base ao actual R. E. B. A. — *Regulamento de Estruturas de Betão Armado,* mostraram todavia que, de acordo com as hipóteses feitas sobre o comportamento do betão e do aço e das secções de betão armado, a sua capacidade de redistribuição de esforços é limitada, não podendo ultrapassar em qualquer caso os 20 %. Deste modo os esforços nas estruturas prefabricadas poderão ainda em geral ser calculados em cálculo elástico linear, embora nalgumas situações possa ser económico admitir alguma redistribuição de esforços entre as secções críticas da estrutura incluindo as ligações.

A caracterização da influência da deformabilidade das ligações na resposta da estrutura quando submetida a acções sísmicas, poderá ser feita a partir da análise dinâmica em regime não-linear da estrutura prefabricada, quando submetida a um conjunto de vibrações transmitidas pelo terreno à fundação que caracterizam o «sismo padrão», técnica que vem sendo utilizada no LNEC para a caracterização do comportamento sísmico de estruturas [23]. Esta análise permitirá quantificar os parâmetros característicos da resposta ou seja determinar o valor do coeficiente sísmico de referência e o factor de ductilidade os quais, de acordo com as formulações mais modernas relativas às acções sísmicas, nomeadamente o documento elaborado no LNEC já referido [16], servem de base ao cálculo do coeficiente sísmico da estrutura.

Este estudo poderá todavia ser simplificado para alguns tipos de estruturas prefabricadas, nomeadamente para aquelas que possuam apenas ligações de continuidade, já que poder-lhe-ão ser aplicadas, directamente ou com ligeiras alterações, as disposições relativas às estruturas reticuladas moldadas em obra. De acordo com o documento atrás referido [16] o coeficiente sísmico de referência duma estrutura é função da sua frequência própria fundamental e do tipo de terreno de fundação, podendo ser aquela obtida, no caso de edifícios correntes com estruturas em pórtico, a partir do seu número de pisos. Por sua vez o factor de ductilidade é fixado em função da ductilidade da estrutura, a qual será máxima para as estruturas metálicas em pórtico, aparecendo sucessivamente, e por ordem decrescente, as estruturas de betão armado em pórtico, as estruturas constituídas por associações de pórticos com paredes ou núcleos de betão armado e por último as estruturas -parede de betão armado. Esta formulação simplificada poderá então ser aplicada aos referidos tipos de estruturas prefabricadas estimando a sua ductilidade, a qual provavelmente não se afastará muito da da estrutura reticulada moldada em obra, ou mesmo nada, no caso de as ligações não estarem localizadas nas extremidades das barras.

Na hipótese de as ligações estarem localizadas nas extremidades das barras, a formulação simplificada poderá ainda ser aplicada ao referido tipo de estruturas, se for adoptado o princípio preconizado pelo ACI-ASCE Commettee 512 [9], projectando as ligações com uma resistência última superior à exigida aos elementos prefabricados. É que, deste modo, as secções críticas da estrutura deixarão de ser as suas ligações, passando a situar-se nos elementos prefabricados, cujo comportamento é igual ao das estruturas de betão moldadas em obra.

3.2.3 — Segurança contra o colapso progressivo

O colapso progressivo é um estado limite último intimamente relacionado com a construção de edifícios prefabricados e depende especialmente do tipo de ligações utilizadas. É geralmente definido como a reacção em cadeia de roturas de elementos e ligações estruturais, provocadas por uma rotura local de um ou vários elementos, que atinge toda a estrutura ou pelo menos uma parte importante dela [24] [25]. Esta questão que tem a ver especialmente com os edifícios prefabricados à base de painéis pesados, assume também importância nos edifícios de estrutura reticulada prefabricada.

O primeiro exemplo de rotura por colapso progressivo, e que, exactamente por isso, se tornou muito conhecido, foi o de Ronan Point (Inglaterra) em 1966, mas há exemplos mais recentes como os de Skyline Plaza (E. U. A.) e de C. Capitan Arenas (Barcelona).

O colapso progressivo pode ser originado por causas de natureza diferente: ou é devido a acções excepcionais, em que a rotura local que desencadeia o processo é originada por uma acção de acidente não tida em conta no projecto (explosões, etc.) ou é devido ao comportamento patológico da estrutura, nomeadamente devido a erros de execução.

Têm sido utilizados, ou propostos, vários métodos de cálculo para eliminar, ou pelo menos reduzir, o risco de colapso progressivo das estruturas prefabricadas, embora apresentem normalmente grande complexidade. LEWICKY por exemplo [24], propõe um método de limitação do risco de rotura local em estruturas porticadas que consiste em considerar uma carga uniformemente distribuída normalmente aos pavimentos, pilares, etc., de 300 kgf/m² equivalente às acções devidas às explosões.

Considera-se, no entanto, que nenhum método pode eliminar o risco de colapso progressivo devido a acções de acidente já que as magnitudes não são limitadas; apenas, quando muito, poderá baixar esse risco a níveis razoáveis. Afigura-se deste modo que para reduzir o risco de rotura por colapso progressivo devido a este tipo de acções as ligações deverão ser projectadas com uma certa ductilidade e deverão ser aumentados os valores do coeficiente de segurança adicional γ_n.

Em relação ao segundo tipo de causas afigura-se que a acção mais eficaz é efectuar um *controlo de qualidade* de execução das ligações, tal que as ligações executadas correspondam de facto ao que foi projectado. Mesmo neste caso poderá ainda justificar-se a adopção de coeficientes de comportamento a incluir no coeficiente de segurança adicional já referido.

3.3. — Protecção contra o fogo

Segundo as formulações mais recentes, o método de protecção de estruturas contra o fogo normalmente preconizado, consiste em garantir a estabilidade da estrutura durante um certo período de actuação do fogo. Essta estabilidade é por sua vez garantida pela adopção de recobrimentos mínimos de betão aos elementos metálicos (armaduras, perfis, etc.) e fixando espessuras mínimas aos elementos da estrutura. Segundo recente documento do C. S. T. B. —

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment — [26], para uma protecção de 1 hora, exige-se às estruturas de betão armado um recobrimento de 2 cm. Tratando-se de ligações, afigura-se que tais recobrimentos deverão ser aumentados, em face do maior risco de a protecção poder estar mal executada. Nos casos em que a protecção for obtida com argamassa deverá ter-se em conta que, de acordo com o documento referido, a protecão de 1 cm de argamassa equivale apenas a 0,67 cm de betão.

Nos E. U. A., o P. C. I., em publicação especializada [27], recomenda, na ausência de informação mais precisa, a protecção das ligações por uma camada de betão com uma espessura, em polegadas (1 in = 2,5 cm), igual ao número de horas que se quer de protecção. Para uma protecção de 1 hora ter-se-á um recobrimento de 2,5 cm de betão.

No caso de ligações realizadas à base de resinas epoxy, em face da perda rápida das suas propriedades mecânicas com o aumento de temperatura, os recobrimentos deverão ser ainda maiores e a espessura da junta deverá ser o mais reduzida possível.

3.4 — Exigências de durabilidade

Nas ligações, as questões de durabilidade põem-se essencialmente na exigência de conservação das propriedades mecânicas dos materiais, principalmente no caso do aço e agora também nas colas à base de resinas epoxy.

Em relação ao aço, a principal acção a evitar é a sua corrosão devida à acção dos agentes corrosivos, principalmente quando em ambientes agressivos (gases, humidade, etc.). A protecção normalmente preconizada na regulamentação é o recobrimento dos elementos metálicos (armaduras, perfis, etc.) por uma camada de betão, embora também sejam recomendadas outras técnicas como sejam a aplicação de pré-esforço de modo a diminuir a fendilhação, as protecções à base de zinco ou com resinas epoxy (ultimamente bastante utilizadas) ou ainda a utilização de aços inoxidáveis. Em relação ao valor do recobrimento de betão para estruturas moldadas em obra, o actual R. E. B. A. [28] preconiza valores não inferiores a 2 cm em elementos não protegidos, mas o documento do C. E. B. já referido [5], recomenda valores superiores, com um mínimo de 2,5 cm. Tratando-se de ligações, e tal como para a protecção contra o fogo, parece pertinente a exigência de adopção de valores superiores.

No que respeita às colas à base de resinas epoxy a questão põe-se essencialmente em relação à sua protecção contra as altas temperaturas (protecção contra os riscos de incêndio) e ao seu comportamento sob as acções cíclicas de carga e descarga.

3.5 — Exigências de execução e de montagem

Uma das exigências mais importantes a que uma solução de ligação deve satisfazer é a facilidade de execução para uma consequente facilidade de montagem dos elementos prefabricados. Em especial serão de evitar soluções de ligações que obriguem a grandes escoramentos das peças prefabricadas pois perder-se-á deste modo uma das grandes vantagens da prefabricação.

Outro aspecto importante desta questão refere-se às tolerâncias de montagem dos elementos. As ligações deverão poder absorver as tolerâncias de fabrico dos elementos. É por esta razão que as ligações aparafusadas apresentam normalmente dificuldades de execução já que exigem tolerâncias muito apertadas às peças prefabricadas. Já as ligações executadas com interposição de argamassa ou betão entre os elementos (caso das ligações de continuidade betonadas em obra, ou das ligações pré-esforçadas) admitem razoáveis tolerâncias aos elementos prefabricados.

Para além das tolerâncias a admitir às peças prefabricadas, as ligações deverão ser concebidas de modo a admitir a si próprias tolerâncias de fabrico. Não é prático, nem económico, ter os vários acessórios duma ligação «ligados como um relógio». Esta questão será abordada ainda mais adiante, nas considerações sobre a concepção e execução de ligações.

3.6 — Exigências de aspecto

As ligações deverão ser concebidas de modo a não criarem conflitos com a arquitectura do edifício. Por exemplo, a solução de vigas apoiadas em cachorros de pilares para ficar à vista, poderá ser aceitável em edifícios industriais ou mesmo em edifícios escolares, mas já não será desejável em edifícios hoteleiros ou de habitação.

As ligações devem ser claras e limpas, e essencialmente pouco notadas na construção. Por outro lado deverão ser evitadas soluções de ligações que criem, em serviço, fendilhações nas superfícies de betão ou nas zonas de contacto de peças prefabricadas como é o caso das ligações de articulação imperfeita. Nestes casos será boa técnica adoptar chanfros nos bordos e cantos das peças.

3.7 — Exigências de economia

A solução adoptada numa ligação de peças prefabricadas deve ser a mais económica possível, satisfazendo às exigências anteriores. As ligações deverão ser simples e de comportamento claro. As ligações complicadas encarecem a obra, ou por excessivo consumo de material (principalmente de aço), ou pelas dificuldades na sua execução, podendo exigir mão-de-obra muito especializada. Também será normalmente solução anti-económica a adopção de excessivo número de ligações numa estrutura. Terá de haver um equilíbrio entre o número de ligações e as dimensões dos elementos prefabricados.

As ligações deverão ser sempre que possível uniformizadas. No caso de se adoptarem ligações à base de dispositivos mecânicos que compreendam, por

exemplo, chapas metálicas ou parafusos, estes elementos deverão ser standardizados. O que se perde com o excesso de materiais é largamente compensado com a economia em custos de estudos de projecto, de execução e de montagem, ficando ainda reduzida a probabilidade de, em obra, haver enganos na localização apropriada daqueles dispositivos.

4 — CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCEPÇÃO E EXECUÇÃO DE LIGAÇÕES

A resolução dos problemas de ligação de peças prefabricadas de betão conduz, normalmente, a soluções para as quais há necessidade de estudar disposições construtivas particulares, bem como as respectivas bases de dimensionamento. Por outro lado a execução das soluções projectadas envolve normalmente cuidados e técnicas especiais para que se possa assegurar que a ligação executada apresenta de facto o comportamento inicialmente previsto.

Apresentam-se seguidamente algumas notas sobre a concepção e execução de ligações realizadas por alguns dos processos referidos no número 2: ligações de gravidade, ligações soldadas, ligações de continuidade moldadas em obra e ligações coladas.

a) *Ligações de gravidade*

São ligações em que os esforços preponderantes são de compressão; encontram-se nos apoios de elementos prefabricados horizontais (vigas, asnas, etc.) ou nos apoios de paredes e de pilares.

Podem ser realizadas apoiando simplesmente um elemento sobre o outro ou com a interposição dum material de repartição: placas de neoprene, teflon, chumbo, etc., ou uma camada de betão ou argamassa. As primeiras, como foi já referido anteriormente, não são, em princípio, aconselháveis, a não ser no caso de haver uma grande precisão de prefabricação e colocação em obra. No caso da adopção da camada de betão ou argamassa, devem ser tomadas precauções para evitar os movimentos relativos das superfíceis de contacto depois do endurecimento do betão ou da argamassa.

No dimensionamento das extremidades das peças e dos pontos da vizinhança da aplicação das cargas, deve ter-se em conta a distribuição real das tensões devendo prever-se armaduras capazes de equilibrar os esforços de tracção transversais, resultantes desta aplicação de cargas localizadas.

b) *Ligações soldadas*

Trata-se dum tipo de ligações não muito vulgarizado entre nós mas de grande uso noutros países, principalmente nos E. U. A. São usadas várias soluções, dispondo-se, nas mais vulgares, chapas ou perfis metálicos nas extremidades dos elementos prefabricados, soldados às armaduras resistentes dos elementos, sendo posteriormente feita a sua ligação em obra, com soldadura.

A utilização deste tipo de soluções, principalmente quando a soldadura das chapas é efectuada em obra, requer cuidados muito especiais. Deverá ser garantida a soldabilidade das chapas bem como a possibilidade de execução em obra das soldaduras. Deverá dar-se grande atenção ao correcto posicionamento das chapas nas extremidades das peças prefabricadas para evitar desalinhamentos em obra. Por outro lado nestas ligações não deverão ser usadas chapas mais largas que as dimensões transversais dos elementos prefabricados para não obrigar à utilização de moldes especiais.

Recomenda-se finalmente a compactação conveniente do betão dos elementos prefabricados junto das chapas metálicas para evitar a formação de chochos ou vazios.

c) *Ligações de continuidade betonadas em obra*

São adoptadas na prática muitas soluções de ligações de peças prefabricadas em que se procura a continuidade dos elementos betonando em obra o espaço existente entre as peças prefabricadas, no qual se realiza a continuidade das armaduras.

Neste tipo de ligações importa garantir primordialmente que os processos de colocação em obra do betão e de continuidade das armaduras cumprem as hipóteses feitas na análise dos esforços da estrutura e no dimensionamento das secções das ligações.

Para realizar a emenda das armaduras são usados, entre outros, os seguintes processos: sobreposição de varões, mangas de envolvimento, acoplamentos roscados e soldadura de varões (Fig. 3).

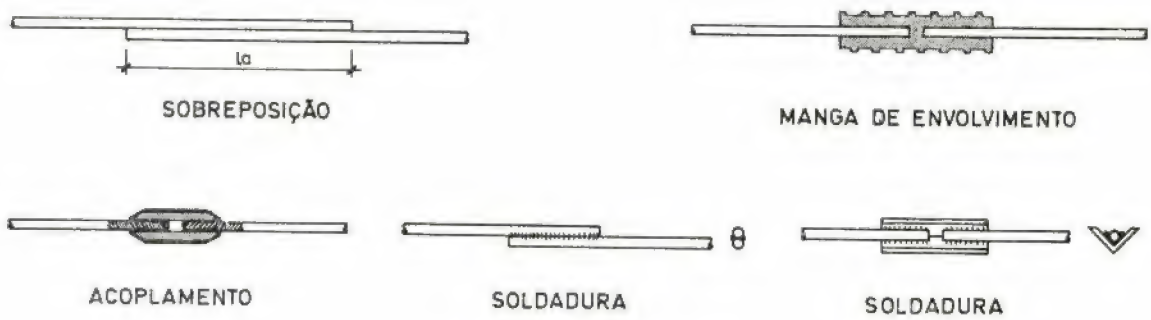


Fig. 3
Técnicas de emenda de varões

Ao processo da sobreposição de varões aplicam-se as regras habituais das estruturas de betão armado quanto aos comprimentos de amarração. No entanto, o R. E. B. A. — *Regulamento de Estruturas de Betão Armado* [28] apenas permite a emenda de um terço das armaduras existentes na mesma secção, devendo as secções onde existam emendas por sobreposição ficar separadas de uma distância pelo menos igual ao comprimento de amarração, o que na prática, acaba por impedir este tipo de solução. O C. E. B., no documento a que já se fez referência [5], formula a emenda de varões em termos um pouco diferentes, permitindo já a emenda de todos os varões numa mesma secção, sendo neste caso o comprimento de amarração dos varões obtido multiplicando um comprimento de amarração de referência por um coeficiente de majoração função da percentagem de varões em emenda relativamente à secção total do aço. Assim por exemplo, se esta percentagem é maior que 50 % e a distância entre juntas é maior que 10 ∅, o coeficiente de majoração é de 1,4. A emenda dos varões por sobreposição exige, em qualquer caso, a colocação, ao longo do comprimento de sobreposição, de armaduras transversais adicionais.

O processo das mangas de envolvimento consiste em envolver as extremidades dos varões a ligar por uma manga constituída por argamassa de betão misturada com resinas epoxy a qual poderá estar, por sua vez, envolvida por uma bainha flexível. Neste processo deve dar-se especial atenção ao modo de execução para que se possa assegurar o correcto alinhamento dos varões dentro da manga. O recobrimento de betão necessário para a manga não deverá contudo ser inferior ao especificado para as armaduras normais.

O processo dos acoplamentos roscados consiste em criar a continuidade dos varões através de acoplamentos cujas extremidades são roscadas às extremidades dos varões a ligar. Este processo exige um alto grau de precisão de execução dada a dificuldade de assegurar um alinhamento perfeito dos varões. O R. E. B. A. permite as emendas roscadas mas apenas em varões de aço de dureza natural, exigindo para efeitos de dimensionamento, que sejam consideradas como secções úteis as secções correspondentes ao fundo da rosca.

Quanto ao processo de emenda de varões por soldadura consiste normalmente em soldar lateralmente os vãos entre si. Uma solução alternativa consiste em soldar transversalmente os varões a um troço de cantoneira, já que esta soldadura é mais fácil de executar (Fig. 3). São-lhe aplicáveis muitas das recomendações atrás referidas para as ligações com perfis metálicos soldados. A emenda por soldadura eléctrica é permitida no R. E. B. A. em varões de soldabilidade garantida, mas para efeitos de dimensionamento, e a menos de comprovação experimental, apenas poderá ser considerada como secção útil da armadura 80 % das secções dos varões soldados. O documento do C. E. B. já referido [5] estipula por seu lado que a soldadura deverá ser feita apenas nas partes rectilíneas dos varões.

No que se refere ao betão envolvente das armaduras, é necessário um cuidado muito especial na sua colocação em obra. Recomenda-se nomeadamente a sua adequada compactação, para evitar a formação de chochos ou outras zonas fracas. Esta operação nem sempre é fácil, em face da grande quantidade de armaduras existente normalmente nestas zonas. Recomenda-se igualmente que aquando da execução das ligações, os elementos a ligar não apresentem uma idade excessiva (no máximo 15 dias) para evitar a retracção diferencial entre betões de idades diferentes. Uma técnica que vem sendo utilizada com bons resultados, para evitar os problemas da retracção diferencial, é a execução de pinturas à base de resinas epoxy sobre as superfícies de betão dos elementos que irão ficar em contacto com o betão novo.

d) *Ligações coladas*

Trata-se duma técnica de ligação em que os elementos prefabricados são ligados topo a topo com a interposição duma cola à base de resinas epoxídicas podendo ser ou não, utilizado pré-esforço para criar rigidez à flexão.

Esta cola é obtida pela cura à temperatura ambiente duma mistura constituída por uma resina epoxídica e dum endurecedor (catalizador) à qual se poderão juntar ainda adjuvantes [29]. A confecção da mistura bem como a sua aplicação em obra exigem cuidados especiais. Assim a mistura deve ser feita lentamente, e iniciada apenas quando o elemento a ligar estiver prestes a ser colocado no lugar; a cola deve ser colocada entre 15 a 30 minutos depois de terminada a mistura e numa espessura uniforme da ordem de 1 a 2 mm.

No momento da aplicação da cola, as superfícies deverão estar perfeitamente limpas e isentas de humidade; apenas no caso de as superfícies ficarem sempre comprimidas ou quando for desprezada a sua resistência à tracção será desnecessário tal tratamento. Exige-se ainda a adequada planitude e paralelismo das superfícies em contacto ou então que uma das superfícies de contacto seja moldada sobre a outra.

Deverá ser dada especial atenção às propriedades mecânicas da cola, as quais deverão ser verificadas através de ensaios. As propriedades essenciais duma cola são a resistência mecânica (à compressão, flexão e corte, e o módulo de elasticidade (obtidos normalmente em ensaios sobre provetes com 7 dias de cura e à temperatura de 20° C), a aderência, e o seu comportamento no tempo e a altas temperaturas.

O conhecimento obtido nas aplicações já efectuadas permite tirar desde já algumas conclusões sobre o comportamento das ligações coladas. A resistência à compressão (a qual deverá ser pelo menos igual à do betão) está normalmente garantida mas já o mesmo se não pode dizer da resistência ao corte, pelo que deverá ser convenientemente ensaiada e submetida a controlo de qualidade.

As principais limitações de uso das resinas epoxy em ligações estruturais são a sua fluência sob cargas de serviço (não muito bem conhecida ainda) e principalmente a perda de resistência a altas temperaturas (caso de incêndios). Nesse sentido em Inglaterra, por exemplo o CP 110 [6] estabelece que as resinas epoxy apenas poderão ser usadas onde exista protecção adequada contra os efeitos do fogo. Presume-se todavia que as resinas epoxy poderão vir a ter futuramente grande aplicação na execução de ligações e, dum modo geral, em betões e argamassas, desde que seja adoptada a necessária protecção.

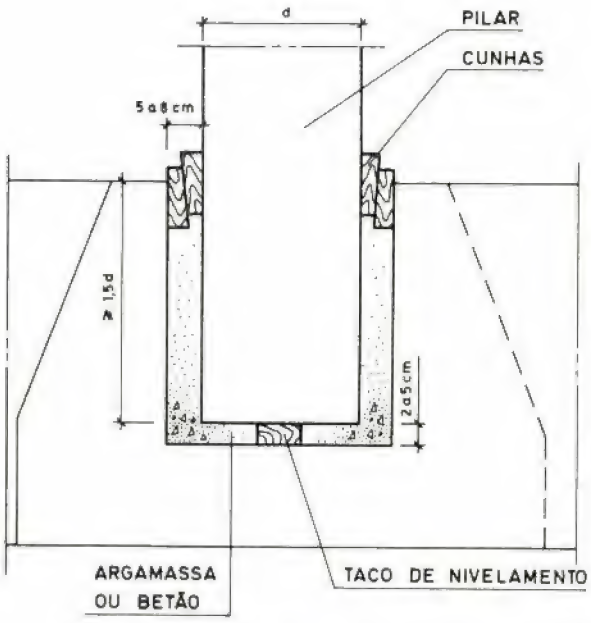


Fig. 4

Ligação pilar-fundação

5 — EXEMPLOS DE LIGAÇÕES

Apresentam-se seguidamente, a título exemplificativo, algumas soluções de ligações, recomendadas internacionalmente, para uso em estruturas reticuladas prefabricadas.

a) *Ligações pilar-fundação*

a. 1 — Fig. 4

O pilar é colocado numa cavidade executada na fundação sendo o espaço remanescente preenchido por argamassa ou betão. Durante esta operação, e até que se faça a presa, a estabilidade lateral do pilar é conseguida através de cunhas, normalmente de madeira. Antes de introduzir o pilar na cavidade, coloca-se no fundo desta uma placa de nivelamento, a qual servirá também para transmitir as cargas do pilar à fundação antes do betão fazer presa.

Ensaios já realizados mostraram que os pilares poderão ser considerados encastrados na sapata desde que a porção de pilar embebida seja pelo menos 1,5 vezes a sua espessura.

a. 2 — Fig. 5

O pilar possui na extremidade inferior uma chapa metálica soldada às suas armaduras longitudinais e cavidades para alojar os parafusos que terão porca dupla. Deverá existir uma folga da ordem de 5 cm, a qual será preenchida com argamassa sem retracção, entre o topo da fundação e a chapa. Os parafusos poderão ser colocados ou a meio das faces (como se mostra na figura) ou nos cantos do pilar. Depois da montagem, as cavidades são geralmente preenchidas com argamassa. Este tipo de solução

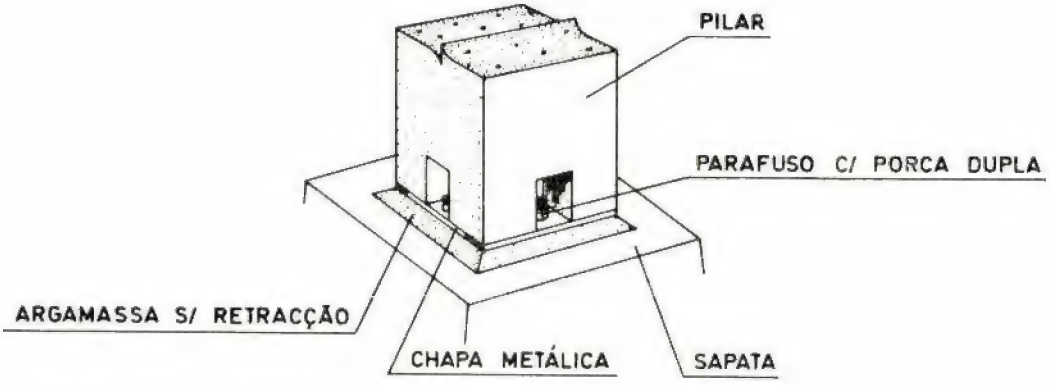


Fig. 5

Ligação pilar-fundação

pode ainda ser usado para ligar outros tipos de peças, nomeadamente em ligações pilar-fundação. Solução recomendada pelo P. C. I. [10], [11].

b) *Ligações pilar-pilar*

b. 1 — Fig. 6

A ligação entre os dois troços de pilar é feita através de varões normalmente projectados do troço superior que são inseridos em cavidades existentes na extremidade do troço inferior formando mangas de envolvimento. Estas cavidades são produzidas normalmente por bainhas metálicas embebidas no betão.

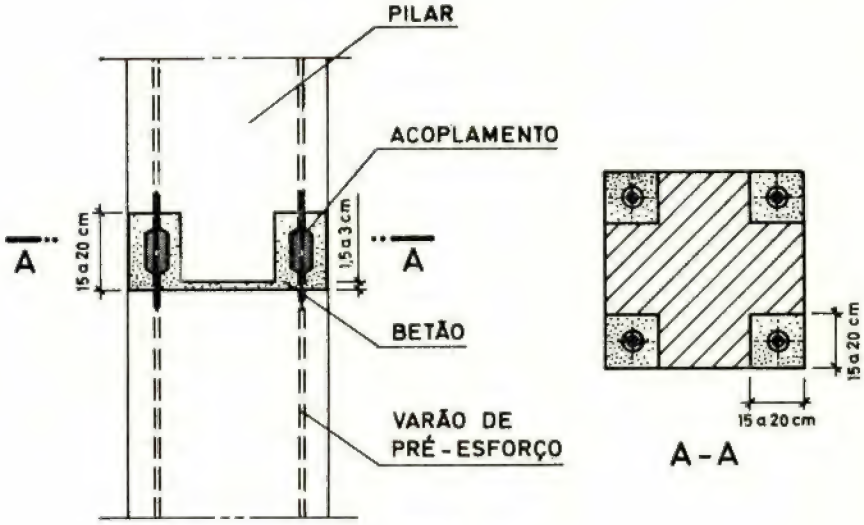


Fig. 6
Ligação pilar-pilar

Os elementos de pilar são pré-esforçados sendo a ligação obtida ligando os varões de pré-esforço por acoplamentos. Será dada especcial atenção ao escoramento dos elementos de pilar durante os trabalhos de execução da ligação. A posição e comprimento dos varões de pré-esforço deverá ser garantida com suficiente precisão. Em regime elástico, a área de secção da ligação pode ser considerada como a secção total do pilar, mas para esforços últimos a área a considerar deverá ser reduzida. Solução recomendada pela F. I. P. [30], para regiões sísmicas.

Posteriormente o espaço remanescente é preenchido com argamassa sem retracção, injectada. Deverá ser dada especial atenção ao escoramento do pilar superior durante a montagem. Solução recomendada pelo P. C. I. [10], [11].

b.2 — Fig. 7

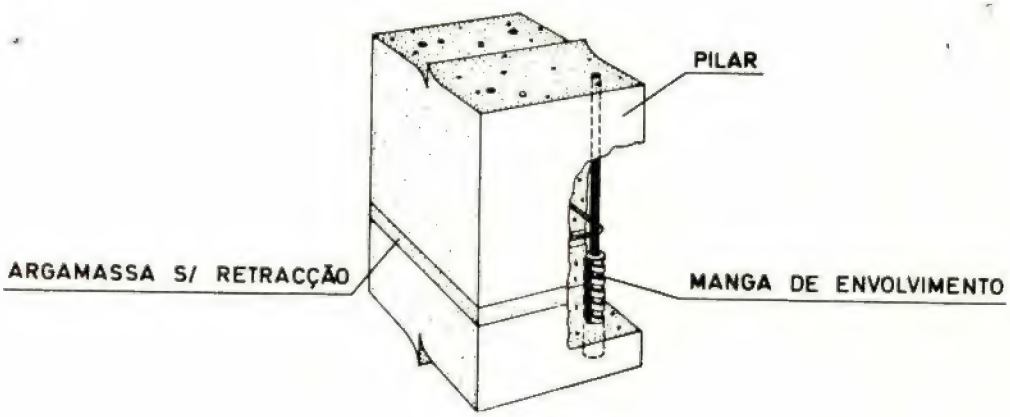


Fig. 7
Ligação pilar-pilar

c) *Ligações pilar-viga*

c. 1 — Fig. 8

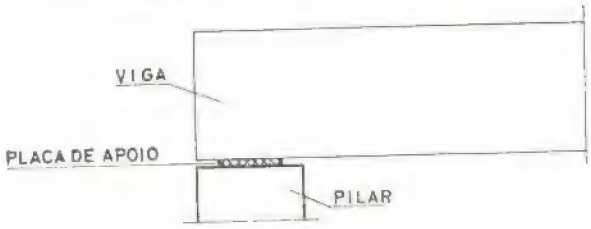


Fig. 8

Ligação pilar-viga

Trata-se duma ligação de gravidade, em que a viga apoia simplesmente no topo do pilar. Para solicitações importantes será conveniente interpor entre as peças prefabricadas uma placa de apoio para distribuir a carga e permitir pequenas rotações sem fendilhar os elementos. É uma solução económica embora praticamente só seja utilizada no apoio de vigas em edifícios industriais. Deve ser dada grande atenção à questão da estabilidade lateral da viga.

c. 2 — Fig. 9

c. 3 — Fig. 10

Esta solução é constituída por pilares ocos e vigas com a parte inferior prefabricada e a parte superior betonada em obra, em geral, simultaneamente com a laje. Na parte superior os pilares possuem recortes destinados a receber as extremidades das vigas. Depois da montagem das vigas são colocadas as armaduras de continuidade entre pilares e as armaduras de continuidade entre vigas após o que se processa a betonagem simultânea do núcleo dos pilares e parte superior das vigas. Em segunda fase faz-se a montagem do pilar superior e a betonagem do respectivo núcleo. Esta solução faz simultaneamente a ligação pilar-viga e a ligação pilar-pilar.

c. 4 — Fig. 11

Trata-se duma ligação pré-esforçada. A viga é colocada sobre apoios temporários amarrados ao pilar após o que se preenche a junta com betão. Após o endurecimento do betão aplica-se o pré-esforço aos varões que atravessam a junta. Não é necessária grande precisão para as peças prefabricadas. Deve ser dada grande atenção ao efeito dos momentos secundários devidos ao pré-esforço. Neste tipo de ligação, a resistência ao esforço transverso é obtida

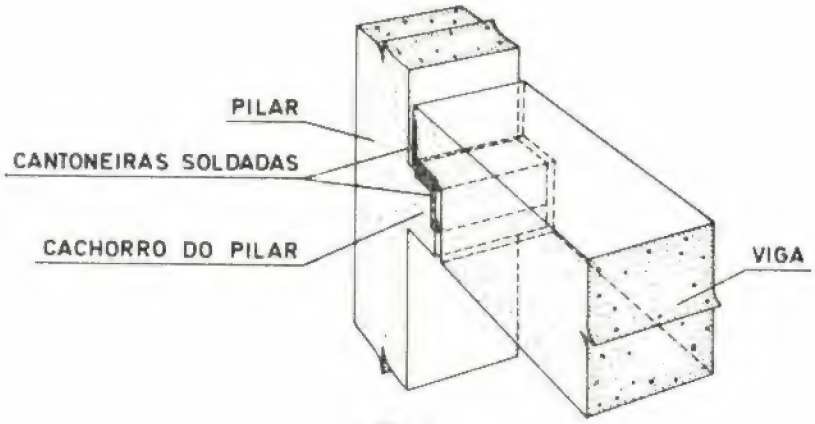


Fig. 9

Ligação pilar-viga

Esta solução de ligação é obtida apoiando a viga num cachorro saliente do pilar. O contacto entre as duas peças é feito normalmente através de perfis metálicos dispostos nas suas extremidades e soldados às suas armaduras, ou através de placas de elastómeros ou de chumbo. Nos cachorros poderão ser utilizadas armaduras ou perfis metálicos envolvidos por betão. No caso de estruturas sujeitas a riscos de incêndio, deverá ser dada especial atenção à protecção dos perfis metálicos. Solução recomendada pela P. C. I. [10], [11].

pelo atrito mobilizado com o pré-esforço aplicado. Solução recomendada pela F. I. P. [30], para regiões sísmicas.

d) *Ligações viga-viga*

d. 1 — Fig. 12

Nesta solução a ligação entre os elementos de viga é realizada através de parafusos que atravessam as suas extremidades. Convém preencher os orifícios dos parafusos com argamassa injectada para proteger

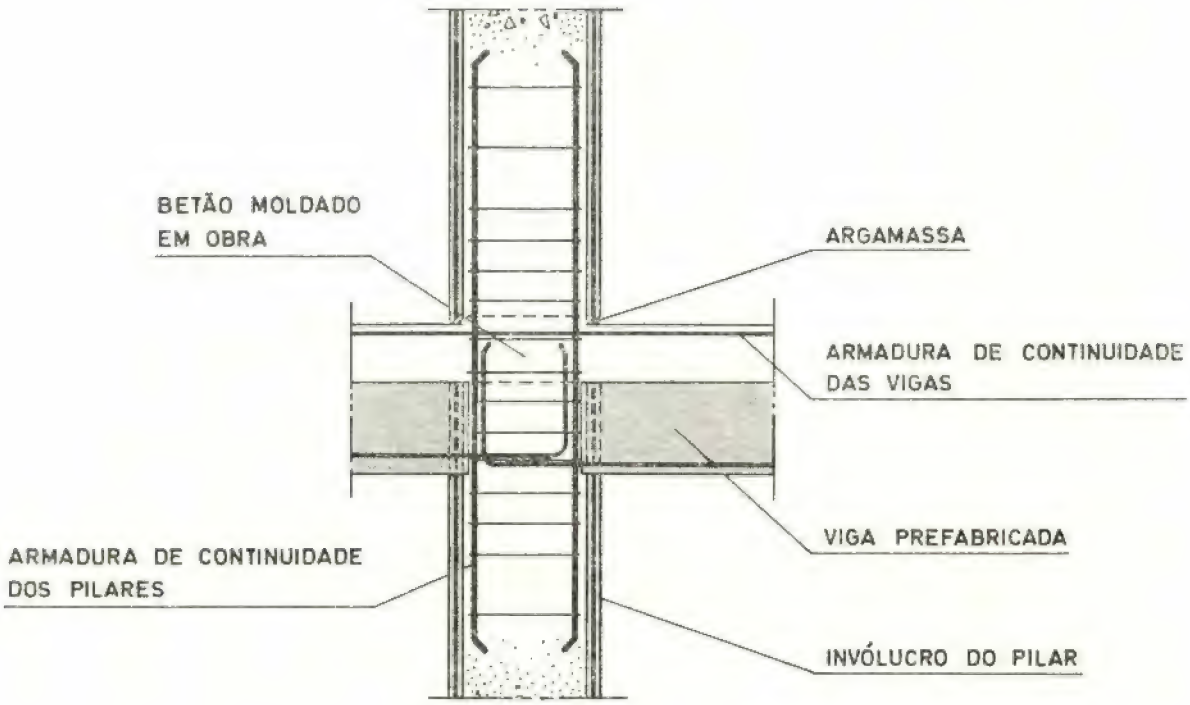


Fig. 10

Ligação pilar-viga

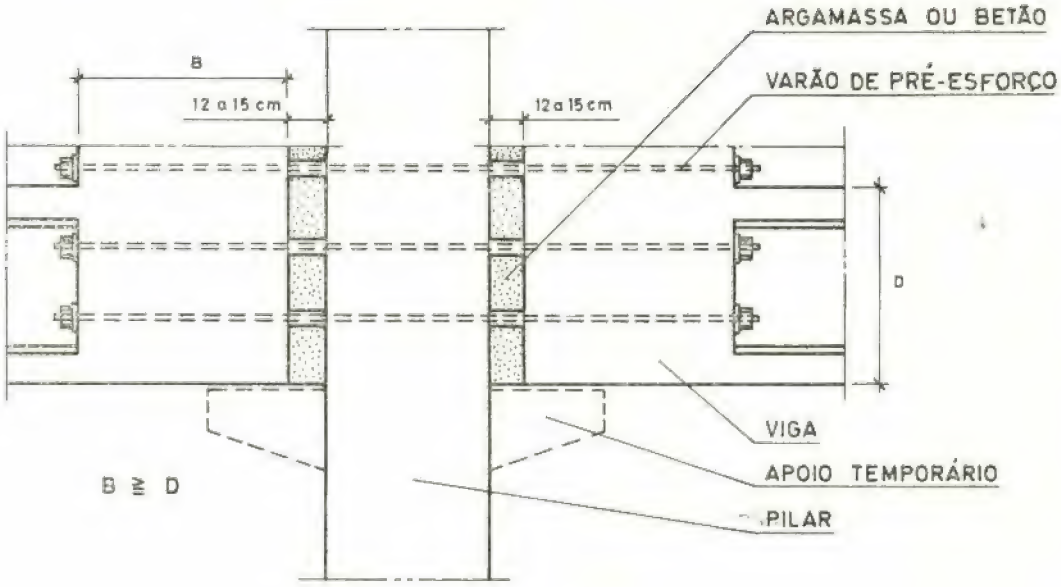


Fig. 11

Ligação pilar-viga

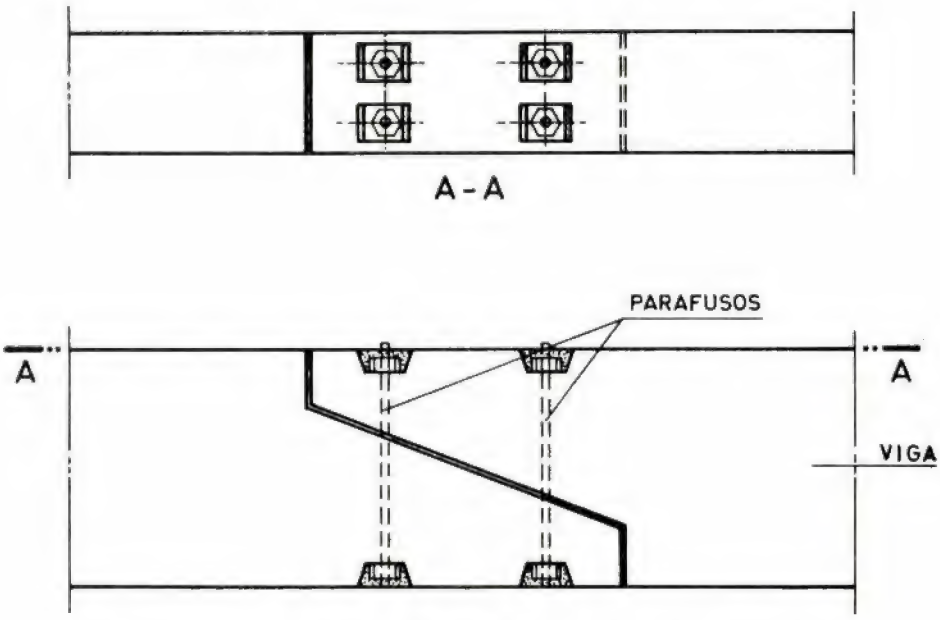


Fig. 12

Ligação viga-viga

o aço. A ligação é simples e rápida mas exige grande precisão dimensional; admite tolerância de montagem muito pequenas. É boa técnica betonar as duas peças em fábrica de modo que a extremidade de uma funcione como cofragem da outra.

d. 2 — Fig. 13

Trata-se duma ligação pré-esforçada, completada com a colagem dos topos dos elementos de viga. As faces das extremidades dos elementos deverão ser perfeitamente planas, com tolerâncias dimensionais muito pequenas. A largura da junta não deve exceder 1 a 2 mm para melhorar o seu comporta-

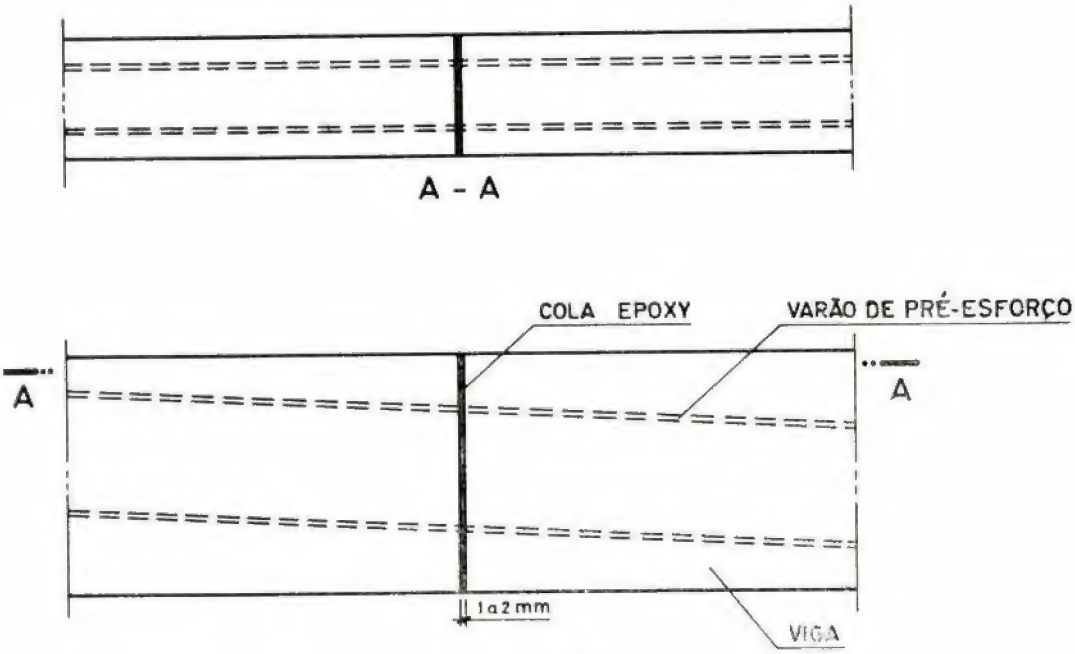


Fig. 13

Ligação viga-viga

mento ao fogo. Trata-se duma solução preconizada pela F. I. P. [30].

e) *Ligações viga-laje*

e. 1 — Fig. 14

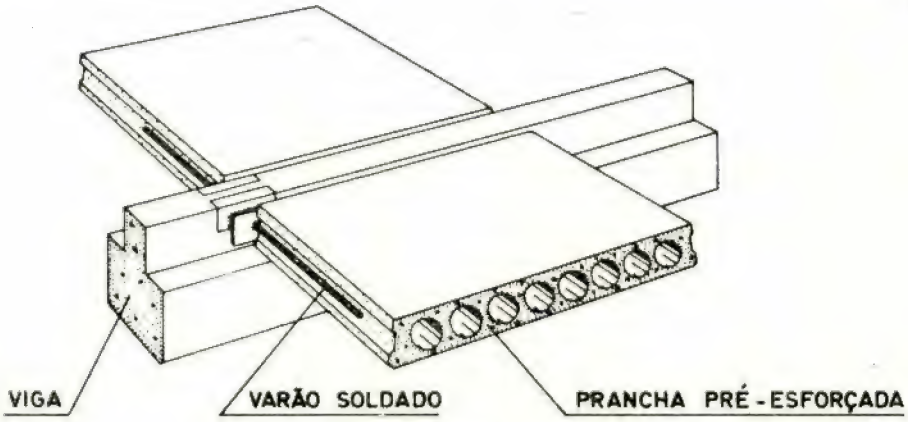


Fig. 14
Ligação laje-viga

Trata-se duma solução de ligação de pranchas pré-esforçadas prefabricadas à viga, recomendada pelo P. C. I. [10], [11]. As pranchas apoiam nas vigas, sendo os esforços tangenciais no plano do pavimento transmitidos através de varões dispostos nas juntas entre pranchas, os quais são soldados a chapas metálicas dispostas nas faces das vigas.

6 — PROGRAMA DE ESTUDOS

Procurou-se neste documento situar o problema das ligações entre peças reticuladas prefabricadas e as suas implicações no comportamento da estrutura. No capítulo 3 referiram-se detalhadamente as exigências a que as ligações deverão dar satisfação, para cumprirem eficazmente a sua função. A garantia do cumprimento dessas exigências obrigará à caracterização exaustiva das ligações sob os vários pontos de vista, nomeadamente quanto ao comportamento estrutural, durabilidade, montagem, aspecto e economia.

No sentido de caracterizar convenientemente certos tipos de ligações, especialmente os de maior interesse para o nosso país, considera-se necessário realizar o seguinte programa de estudos.

a) Estudar os métodos de ensaio convenientes para caracterização do comportamento mecânico de cada tipo de ligação; sua tipificação e normalização;

b) Realizar ensaios segundo os métodos normalizados sobre soluções-tipo de ligações, cujo comportamento não seja ainda bem conhecido, e estudar as respectivas idealizações de comportamento estrutural;

c) Estudar a influência do comportamento das ligações no comportamento da estrutura prefabricada, nomeadamente a sua influência na redistribuição de esforços da estrutura em regime não linear;

d) Estudar a influência de cada ligação no comportamento sísmico da estrutura prefabricada através da análise dinâmica, de modo a definir o valor do coeficiente sísmico respectivo;

e) Calcular, com base nos resultados dos estudos anteriores, o valor (ou valores) do coeficiente de segurança adicional γ_n de cada ligação;

f) Estudar as tolerâncias dimensionais admissíveis das peças prefabricadas em função do tipo de ligação adoptado;

g) Preparar uma ficha de caracterização de ligações, tendo em conta as várias exigências;

h) Elaborar fichas de caracterização das soluções de ligações com mais interesse no País, tendo em conta a informação atrás referida, ou informação coligida de bibliografia especializada.

REFERÊNCIAS

[1] **Ordonês, J. A.**—«Prefabricacion, Teoria e Práctica» (Seminário de Prefrabricacion), Barcelona, 1974.

[2] **Despeyroux, J.** — «Structural Connexion Problems». Proceedings of the Symposium on Design Phylosophy and its Application to Precast Concrete Structures. Cement and Concrete Association (C. C. A.) London, May, 1967.

[3] **Hanson, T.** — «Anclaje Estructural en Concreto Presforzado Prefabricado». Revista I. M. C. Y. C., Vol. 8, N.º 45, Mexico, Julio-Agosto, 1970.

[4] **Burhouse, P.** — «Conexiones en Concreto Estructural». Revista I. M. C. Y. C. Vol. 7, N.º 37, Mexico, Marzo-Abril, 1969.

[5] **CEB** — «Code-Modèle pour les Structures en Beton (3.º project)». C. E. B., Bulletin d'Information 117-F, Paris, 1976.

[6] **CP110** — «Code of Practice for the Structural Use of Concrete — Part 1.» British Standards Institution, London, 1972.

[7] **DIN 1045** — «Construcción de Hormigón Y Hormigón Armado. Cálculo Y Ejecución» (Tradução espanhola). Bilbao, 1972.

[8] **Règles CCBA 68** — «Règles Techniques de Conception et de Calcul des Ouvrages et Constructions em Beton Armé (D. T. U.)». Paris, Mai 1968, Julliet 1970.

[9] **ACI-ASCE Commettee 512** — «Suggested Design of Joints and Connections in Precast Structural Concrete». Manual of Concrete Practice, Part 3, ACI, 1972.

[10] **PCI** — «PCI Design Handbook — Precast and Prestressed Concrete». Prestressed Concrete Institute (PCI), Chicago, U. S. A., 1971.

[11] **PCI** — «Manual on Design of Connections for Precast Prestressed Concrete». PCI, Chicago, U. S. A., 1973.

[12] **Derbez, F.; Martin, J.** — «Conexiones entre Elementos Horizontales y Verticales en Estructuras Prefabricadas de Concreto». Revista IMCYC, Vol. 8, N.º 48, Mexico, Enero-Febrero, 1971.

[13] **Wood, R. H.** — «The Effects of the Properties of Joints on the Over-all Stability of Tall Buildings». Proceedings of the Symposium on Design Phylosophy and its Application to Precast Concrete Structures. Cement and Concrete Association, May, 1967.

[14] **Pectu, V.** — «Optimisation des Structures en Beton Armé Prefabriqué». Seminaire sur Les Methodes d'Optimisation dans la Construction. Paris, 1975.

[15] **C. E. B.** — «Common Unified Rules for Diffrent Types of Construction and Material». Comité Euro-International du Béton, Bulletin D'Information 116-E, Paris, 1976.

[16] **LNEC** — «Projecto de Regulamento de Segurança e Solicitações em Estruturas de Edifícios e Pontes» (Doc. 6, 7). LNEC, 1975.

[17] **LNEC** — «Projecto de Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado» (Doc. 1). LNEC, 1976.

[18] **Lafraugh, R. W.; Magura, D.** — Conexiones en Estructuras de Concreto Prefabricadas. Columnas con Placas Base». Revista I. M. C. Y. C., Vol. 4, N.º 24, Mexico, Enero-Febrero, 1967.

[19] **Spyra, J.; Smith, R. B.** — Tests of Efficiency of Joints to Precast Concrete Members». Civil Engineering and Public Works Review, Vol. 53, n.ºs 628-629-630, 1958.

[20] **Blakeley, R. W.; Park, R.** — «Seismic Resistance of Prestressed Concrete Beam-Column Assemblies». ACI Journal, Proceedings, V., N.º, September 1971.

[21] **Monteiro, V.** — «Deformabilidade de Estruturas de Betão Armado» (Tese para Especialista). LNEC, 1965.

[22] **Ferry Borges, J.; Arga e Lima, J.; Teixeira Coelho, A.; Monteiro, V.** — «Analictical Results Concerning the Non-linear Behaviour of Reinforced Concrete Structures». LNEC, 1964.

[23] **Ravara, A** — «O Comportamento de Estruturas de Betão Armado sob a Acção dos Sismos» (Tese para Especialista). LNEC, 1966.

[24] **Solana, V.** — «Acciones Excepcionales y Colapso Progressivo en Estructuras de Edificación». Hormigon y Acero, n.º 122, 1.º Trimestre, Madrid, 1977.

[25] **Popoff, A.** — «Design Considerations for a Precast Prestressed Apartment Building — Design Against Progressive Colapse». PCI Journal, Vol. 20, N.º 2, 1975.

[26] **C. S. T. B.** — «Méthode de Prevision par le Calcul du Comportement au Feu des Structures en Bèton» (D. T. U.). Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (C. S. T. B.), Paris, Octobre, 1974.

[27] **PCI** — «Arquitectural Precast Concrete». PCI, U. S. A., 1973.

[28] **R. E. B. A.** — «Regulamento de Estruturas de Betão Armado». Decreto N.º 47 723, de 20 de Maio de 1967.

[29] **Hugenschmidt, F.** — «Epoxy Adhesives in Precast Prestressed Concrete Construction». PCI Journal, March-April, 1974.

[30] **F. I. P.** — «Examples of Joints». Fédération Internationale de la Précontrainte (Seismic Commission), Second Draft, July, 1976.

C. D. U. 627.8.09(679.4)

A engenharia nacional e a instalação de unidades de grande potência. O caso de Cabora-Bassa

ALBERTO ABECASIS MANZANARES (1)
ANTÓNIO CARRISSO (1)
ANTÓNIO DE CARVALHO QUINTELA (1)
ANTÓNIO JOSÉ DA COSTA SANTOS (1)
JOÃO DE SALVADOR FERNANDES (1)

RESUMO

Apresenta-se o caso de Cabora-Bassa como testemunho da capacidade da engenharia portuguesa para a concepção e o projecto da instalação de unidades hidroeléctricas de grande potência.

Depois de uma descrição geral do aproveitamento, referem-se resumidamente os principais condicionamentos e problemas enfrentados, evidenciando a necessidade da sua consideração conjunta pelos fornecedores dos equipamentos e pelos projectistas das instalações.

SUMMARY

The hydro-electric scheme of Cabora-Bassa is presented in order to attest the capacity of the Portuguese Engineering in the conception and design of power stations equipped with large units.

After a general description of the scheme, the principal constraints and problems which have been confronted are briefly referred, in order to emphasise the necessity that they must be jointly solved by the equipment manufacturers and the Consultants.

1 — INTRODUÇÃO

Cabora-Bassa é o primeiro escalão do aproveitamento hidroeléctrico do rio Zambeze em Moçambique.

Localiza-se cerca de 250 km para este do Zumbo, povoação fronteiriça com a Rodésia e a Zâmbia, situada na confluência do Zambeze com o seu afluente Aruângua, beneficiando da regularização proveniente do aproveitamento hidroeléctrico de Kariba.

O aproveitamento de Cabora-Bassa compreende, no que respeita a obras principais, a barragem, os circuitos hidráulicos, as centrais e a subestação, e, no que se refere a obras acessórias, os acessos, os bairros e os sistemas de saneamento, de abastecimento de energia eléctrica e de comunicações.

No desenvolvimento deste trabalho só se consideram as obras principais, de que se apresenta uma breve descrição, completada com um quadro-resumo das características do aproveitamento.

A central sul e o respectivo circuito hidráulico são tratados mais pormenorizadamente, com o objectivo dominante de evidenciar os principais problemas que resultam da instalação de grupos de grande potência.

2 — CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DO APROVEITAMENTO. DIMENSIONAMENTO DAS CENTRAIS

2.1 — Características hidrológicas e energéticas

As características hidrológicas e energéticas de maior interesse encontram-se sintetizadas no quadro junto.

Tem ainda interesse referir o seguinte:

— Sendo o escoamento anual médio afluente à bacia própria de Cabora-Bassa igual a $45\,000 \times 10^6$ m³ e a capacidade útil da albufeira do aproveitamento igual a $51\,750 \times 10^6$ m³, a albufeira é de regularização interanual, com coeficiente 1,14 para a bacia própria.

(1) Hidrotécnica Portuguesa, Consultores para Estudos e Projectos, Ld.ª (HP).

Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

— Com a garantia de ser fornecida num triénio seco de probabilidade de ocorrência de uma vez em 100, a energia anual produtível é de 18 500 GWh e eleva-se para 20 500 GWh, para probabilidade de ocorrência de uma vez em 20.
— As energias permanentes indicadas correspondem, respectivamente, as potências permanentes de

$$\frac{18\,500}{8\,760} \simeq 2100\ \text{MW}$$

com a garantia de 99 %, e de

$$\frac{20\,500}{8\,760} \simeq 2350\ \text{MW}$$

com a garantia de 95 %

— Das conversações havidas com os clientes mais importantes à data do projecto, nomeadamente com a República da Africa do Sul, concluiu-se que a utilização da central variaria entre 8 760 h e 6 000 h.

Tomou-se para base a utilização de 7 000 h, ou seja um factor de carga de 80 %, sendo, nessas condições, a potência com a garantia de 99 % igual a 2 640 MW.

2.2 — Potência unitária dos grupos. Potência total e sua repartição

O estabelecimento da potência unitária da ordem de 400 MW para os grupos foi decidido em face de dois condicionamentos principais:

— pretendeu-se, em primeiro lugar, equipar as centrais com grupos de grande potência, para reduzir o custo do aproveitamento por unidade de potência instalada;
— em segundo lugar, teve-se em consideração que essa potência era limitada pela capacidade dos grandes construtores para realizarem turbinas e alternadores de grande potência, à data de fixação das características dos grupos. O valor de 400 MW pareceu então estar — em face da evolução que se tinha verificado nas técnicas de construção e nas dimensões dos grupos turbina-alternador então em serviço — ao alcance imediato dos grandes construtores.

Para cobrir a potência garantida com a utilização de 7 000 h (2 640 MW) foi prevista a instalação de sete grupos.

Em face dos consumos a satisfazer a curto prazo, a central construída na primeira fase — central sul — foi equipada com cinco grupos, um dos quais de reserva. Para a segunda fase, foi prevista a construção de outra central na margem oposta — central norte — com quatro grupos, um dos quais de reserva.

A previsão de duas centrais — uma em cada margem — resultou das condições topográficas locais, das dimensões dos grupos e do objectivo de encurtar quanto possível os circuitos hidráulicos.

Deve notar-se que a potência unitária de 400 MW atrás referida é a máxima que cada grupo pode fornecer ao barramento a 220 kV da subestação. A potência nominal dos grupos foi fixada em 480 MVA, sob um factor de potência de 0,85, correspondendo o respectivo aumento de potência aos serviços auxiliares do grupo, incluindo a excitação, e às perdas.

3 — BREVE DESCRIÇÃO DO APROVEITAMENTO

3.1 — Condições locais

O local escolhido para o aproveitamento de Cabora-Bassa situa-se no rio Zambeze, a jusante da confluência com o Mucangádzi, no início de um troço em que o rio passa a ficar encaixado numa estreita garganta rochosa. Este troço do rio apresenta condições morfológicas e geológicas particularmente favoráveis para a construção do aproveitamento, permitindo a implantação de uma barragem de tipo abóbada com um pequeno volume, quer de betão, quer de escavações.

A rocha no local é constituída por um gneisse granitóide, de excelentes qualidades mecânicas, que, não obstante a existência de alguns filões lamprofíricos e gábricos que puseram problemas de projecto e de execução, permitiram a escavação de cavernas e galerias de grandes dimensões para a central sul, circuito hidráulico e galerias de desvio provisório.

3.2 — Barragem

A barragem é do tipo abóbada, simétrica, de dupla curvatura. A abóbada insere-se directamente na fundação rochosa, com a excepção de pequenos socos de inserção em zonas limitadas, onde a fundação o exigiu, e de um pequeno encontro de gravidade na margem direita. A ausência de um soco geral de distribuição de tensões foi decidida em face da excepcional resistência à compressão da fundação rochosa.

A fundação do perfil central da barragem situa-se à cota 167,50 e a directriz do coroamento apresenta uma corda de cerca de 257 m, à cota 326,00. Por cima do coroamento desenvolve-se uma estrada à cota 331,00, constituída por laje apoiada em pilares do lado de jusante, e um muro maciço de betão do lado de montante. Na zona central, este muro maciço é interrompido por um pequeno descarregador de superfície, de emergência, sobre o qual a continuidade da estrada é garantida por um pontão.

No corpo da barragem situam-se os órgãos de evacuação de cheias constituídos por oito orifícios, em dois grupos simétricos em relação ao eixo da barragem. Os orifícios são munidos de comportas de segmento a jusante, podendo ser obturados, a montante, por meio de uma comporta-ensecadeira, accionada por um pórtico, cujo caminho de rolamento se

situa à cota 331,00, numa plataforma constituída por um alargamento da estrada sobre a barragem.

Os elevados caudais de ponta das cheias naturais determinaram que se reservassem na albufeira, nos meses de Fevereiro, Março e Abril, volumes para o encaixe das afluências, mediante a adopção de uma curva-guia superior, [1]. Não obstante o amortecimento conseguido, os evacuadores de cheia têm uma capacidade de 13 200 $m^3 s^{-1}$ para o nível de máxima cheia.

A construção da barragem implicou a execução de obras de desvio provisório bastante complexas, em face do regime de caudais do rio Zambeze. Construiram-se ensecadeiras galgáveis durante as cheias e duas galerias, uma em cada margem capazes de desviar o caudal total de 4 500 $m^3 s^{-1}$, [2].

3.3 — Circuitos hidráulicos, centrais e subestação

A central sul, situa-se numa caverna, orientada sensivelmente no sentido Norte-Sul, e é equipada com cinco grupos, com uma distância entre eixos de 30,00 m. A galeria dos transformadores desenvolve-se paralelamente à caverna da central, do lado de montante (Fig. 1).

As tomadas de água são independentes para cada grupo e continuadas por condutas forçadas subterrâneas, de secção circular de 9,70 m de diâmetro.

A jusante da central sul, o circuito hidráulico é constituído por galerias no prolongamento dos difusores e por dois sistemas de chaminé de equilíbrio e galeria de fuga, independentes entre si. O sistema, que apresenta a galeria de fuga mais curta, transporta o caudal absorvido por três turbinas e o outro sistema, o caudal correspondente a duas turbinas.

Na central norte, foi prevista a instalação de quatro grupos, apresentando circuitos hidráulicos independentes, a montante, e duas galerias de fuga, a jusante, cada uma servindo duas turbinas, e sem chaminés de equilíbrio. Encarou-se ainda o aproveitamento dum troço da galeria de desvio provisório para funcionar como galeria de fuga.

A subestação do Songo compreende uma subestação AC a 220 kV e uma subestação conversora AC/ /DC, ocupando uma área aproximada de 450 × 450 m^2.

A primeira é constituída, na fase correspondente à central sul completa, por 19 painéis e duplo barramento, estando previsto espaço para montar um terceiro. Os painéis destinam-se a cinco chegadas de gerador, oito alimentações de pontes conversoras, duas saídas para os transformadores dos serviços auxiliares, duas para os dos filtros, uma para linha a 220 kV em direcção de Tete e Chimoio e um painel de transferência.

Na subestação conversora estarão então instaladas oito pontes conversoras (quatro em cada polo) permitindo a alimentação da subestação Apollo (África do Sul) através de duas linhas monopolares de ± 533 kV e 1800 A.

O ponto médio da subestação conversora está ligado à terra através de um eléctrodo de terra que permite o trânsito de 3300 A durante 72 h.

4 — CIRCUITO HIDRÁULICO DA CENTRAL SUL

4.1 — Descrição

A tomada de água para cada turbina faz-se através de dois vãos de 10,08 × 20,30 m^2, protegidos por grelhas e separados por um pilar. O conjunto das tomadas de água dispõe-se paralelamente ao eixo da central e o afastamento entre pilares é igual ao afastamento entre grupos, pelo que as cinco condutas forçadas resultam iguais e com o mesmo afastamento entre eixos.

A jusante das comportas de protecção instaladas nas tomadas de água, iniciam-se as condutas forçadas, com um primeiro troço de declive 1:1 e uma curva circular de ligação ao segundo troço, com o eixo de nível com o da evoluta.

As condutas forçadas são blindadas a jusante da secção com eixo à cota 225,00.

Os difusores, bipartidos por meio de um pilar, são continuados por galerias que se reunem nas chaminés de equilíbrio. As galerias de fuga (cuja secção corrente, com pés direitos e abóbada circular, só é revestida na abóbada, em grande parte do desenvolvimento) partem das chaminés de equilíbrio e terminam, na restituição para o rio, por estruturas que apresentam secção progressivamente crescente para jusante, soleira ascendente até à cota 195,00 e um pilar central. Um jogo de ensecadeiras permite isolar do rio qualquer das galerias de fuga, conseguindo-se o esvaziamento destas através do sistema de esgoto da central.

QUADRO DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO APROVEITAMENTO DE CABORA-BASSA

1 — *CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS E ENERGÉTICAS*

Bacia hidrográfica total	900 000 km²
Bacia hidrográfica dominada por Kariba	518 000 km²
Escoamento anual médio da bacia própria	45 000 × 10⁶m³
Escoamento anual garantido por Kariba	37 000 × 10⁶m³
Escoamento anual na bacia própria:	
com probabilidade de 99 %	14 000 × 10⁶m³
com probabilidade de 95 %	23 000 × 10⁶m³
Escoamento trienal na bacia própria:	
com probabilidade de 99 %	81 260 × 10⁶m³
com probabilidade de 95 %	97 800 × 10⁶m³
Energia anual garantida em triénio seco:	
com probabilidade de 99 %	18 500 GWh
com probabilidade de 95 %	20 500 GWh
Energia sobrante média anual:	
na exploração a 99 % de garantia	3200 GWh
na exploração a 95 % de garantia	1330 GWh
Potência garantida com probabilidade de 0,99 durante 7000 h anuais	2640 MW
Potência total instalável	(7 + 2) × 400(1) = 3600 MW
Potência instalada na central sul	5 × 400(1) = 2000 MW
Potência a instalar na central norte	4 × 400(1) = 1600 MW

2 — *ALBUFEIRA*

Cota do nível de máxima cheia (NMC)	329,00
Cota do nível de pleno armazenamento (NPA)	326,00
Cota do nível mínimo de exploração (NME)	295,00
Capacidade útil da albufeira para o NPA	51 750 × 10⁶m³
Superfície inundada para o NPA	2670 km²

3 — *BARRAGEM*

Tipo abóbada	
Coroamento à cota	331,00
Cota mínima na fundação	167,50
Espessura máxima na fundação do perfil central	23,00 m
Espessura mínima do coroamento	4,00 m
Evacuador de cheias por oito orifícios com comportas de segmento, para vãos de 6,00 × 7,80 m², soleira à cota 243,77 e uma comporta-ensecadeira, para	13 200 m³s⁻¹
Descarga de emergência no coroamento, com comporta de alça, com vão de 12,00 m e soleira à cota	320,00

4 — *DESVIO PROVISÓRIO*

Ensecadeiras galgáveis	
Coroamento da ensecadeira de montante	220,00
Coroamento da ensecadeira de jusante	215,00
Cota do fundo do rio	≈ 180
Galerias de desvio com capacidade total de	4500 m³s⁻¹
Galeria da margem direita	S = 236 m², L = 414 m
Galeria da margem esquerda	S = 236 m², L = 518 m

(1) Potência no barramento a 220 kV.

5 — *CIRCUITO HIDRAULICO*

5.1 — *Constituição*

Cinco tomadas de água independentes, cada uma para o caudal máximo de	452 m^3s^{-1}
Cinco condutas forçadas com o diâmetro interior de 9,70 m, blindadas abaixo da secção de eixo à cota	225,00
Dois sistemas de chaminés de equilíbrio e galerias de fuga:	
Sistema norte: galeria de fuga...	S= 287 m^2, L=242 m
chaminé de equilíbrio	S=1500 m^2,
Sistema sul : galeria de fuga...	S= 262 m^2, L=332 m
chaminé de equilíbrio	S=1600 m^2

5.2 — *Equipamento hidromecânico*

Grelhas para protecção de dez vãos de	10,08×20,30 m^2
Máquina limpa-grelhas automática	
Cinco comportas de protecção das condutas forçadas, para vãos de 8,90×10,96 m^2, soleira à cota	274,96
Uma ensecadeira para vãos de	9,60×12,55 m^2
Um jogo de duas ensecadeiras na restituição para vãos de 11,50×17,00 m, soleira à cota...	194,00

6 — *CENTRAL E ANEXOS*

6.1 — *Central*

Altura máxima de escavação	59 m
Largura máxima de escavação	29 m
Comprimento	217 m
Cota do fecho da abóbada	229,20
Cota do piso principal	206,60
Cota da soleira dos difusores	175,13

6.2 — *Galeria dos transformadores*

Altura máxima	13,40 m
Largura...	11,00 m
Comprimento	186,25 m

6.4 — *Equipamento hidromecânico*

Cinco turbinas tipo Francis, de 415 MW, 107,1 rpm	
Nível na restituição ($Q=0\ ms^{-1}$), à cota da saída das galerias	195,00
Nível na restituição para o caudal médio de 2400 $m^3\ s^{-1}$	205,00
Potência para a queda útil de 103,50 m	415 MW
Caudal máximo para a queda útil de 103,50 m	452 $m^3\ s^{-1}$
Queda útil para o cume da colina de rendimentos	113,50 m
Dez comportas dos difusores para vãos de 6,00×5,75 m^2, soleira à cota	194,00

6.5 — *Equipamento eléctrico principal*

Cinco alternadores

Potência nominal	480 MVA
Factor de potência	0,85
Tensão nominal	16 kV
Momento de inércia...	100 000 t m^2

Transformadores

Unidades monofásicas, associadas em 5 bancos trifásicos Yd5	
Potência unitária	160 MVA
Relação de transformação	$230/\sqrt{3}$ kV ± 5 %/16 kV

Barras blindadas

Secção do condutor (Al)	394 cm²
Intensidade nominal	17 300 A
Diâmetro do invólucro	115 cm
Secção do invólucro	360 cm²
Perdas (nas 3 fases)	1950 W m⁻¹

Cabos de alta-tensão

Tipo óleo sob pressão	
Secção do condutor (Cu)	1000 mm²
Diâmetro exterior	100 mm
Perdas totais por fase	48 W m⁻¹

6.6 — Equipamento de manutenção

Duas pontes rolantes de 500 t com travessão de acopulamento para levantamento do rotor do alternador.

4.2 — Equipamento

O equipamento do circuito hidráulico é constituído por grelhas, máquina limpa-grelhas, comportas de protecção e ensecadeira, na tomada de água, e por um jogo de ensecadeiras, na restituição.

As grelhas, que protegem dez vãos dispostos num plano de declive 2,17:1, são constituídas por painéis com fixações de aço inoxidável. A sua limpeza é assegurada por uma máquina-limpa grelhas de funcionamento automático.

Em cada tomada de água está instalada uma comporta plana para protecção da turbina, manobrada por um servo-motor. A abertura da comporta, quando a conduta forçada for posta a seco, é feita inicialmente para uma posição que deixa uma altura livre de 0,10 m, através da qual se consegue o enchimento da conduta em condições convenientes; findo o enchimento, a comporta abre totalmente. Uma ensecadeira de elementos pode ser instalada, por meio de um pórtico móvel, a montante de qualquer das comportas de protecção, para permitir a inspecção destas e das respectivas peças fixas. Esta ensecadeira é dotada de vedação a montante, pelo que as suas peças fixas também podem ser inspeccionadas, com excepção do troço inferior, em que as mesmas têm revestimento de aço inoxidável.

Um jogo de ensecadeiras, de elementos, pode obturar os dois vãos da estrutura de restituição de qualquer das galerias de fuga. A manobra dos elementos é assegurada por pórtico móvel.

4.3 — Problemas especiais no projecto

A concepção e o projecto do circuito hidráulico a montante da central não pôs problemas especiais, a não ser os da estabilidade dos taludes da plataforma de alimentação das tomadas de água, localizada numa zona com espessa camada de meteorização.

Em relação ao circuito hidráulico a jusante da central, admitira-se inicialmente o esquema de chaminés de equilíbrio com estrangulamento na ligação às galerias que prolongam os difusores e que só a jusante das chaminés de equilíbrio se reuniam nas galerias de fuga.

Tal esquema veio a ser abandonado pelo receio da possibilidade de ressonância, especialmente partilhado pelos fornecedores das turbinas, que contratualmente tinham a seu cargo a definição de formas dos difusores e galerias a jusante até à sua junção nas galerias de fuga.

No esquema finalmente adoptado, as galerias que prolongam os difusores reunem-se nas chaminés de equilíbrio, de onde partem as galerias de fuga.

Refira-se a adopção de uma disposição não muito vulgar: a jusante dos difusores, a secção aumenta bruscamente. Essa disposição foi recomendada pelos fornecedores das turbinas, segundo a sua experiência, com a finalidade de, para jusante dela, procurar eliminar as flutuações periódicas de pressão originadas à saída das rodas das turbinas no funcionamento com cargas parciais, evitando a sua eventual ampliação por ressonância.

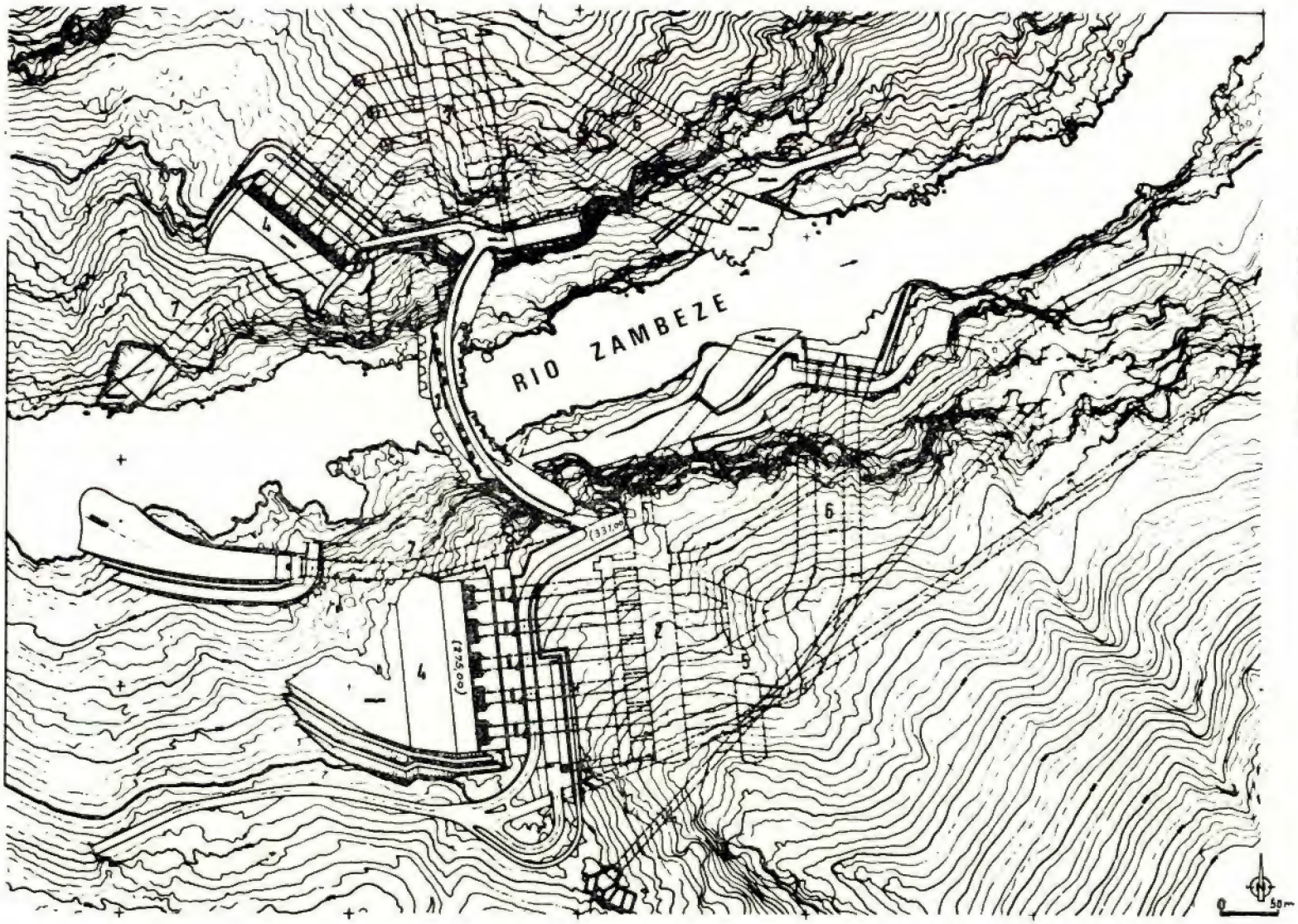


Fig. 1
Planta geral do aproveitamento

Houve necessidade de analisar desenvolvidamente o problema do efeito da altura cinética sobre a secção mínima das chaminés de equilíbrio que assegura a estabilidade de regulação, com carga constante.

A clássica fórmula de Thoma (que fornece o valor mínimo da secção da chaminé, F_{min}, para o para o qual as pequenas oscilações se mantêm, sem amortecimento nem ampliação), se for corrigida para entrar em consideração com o efeito da altura cinética, toma a forma

$$F_{min} = \frac{W_o^2}{2g} \frac{Lf}{H_o (P_o + \lambda E_o)}$$

em que é:

W_o, P_o, E_o — velocidade, perda de carga e altura cinética na galeria, em regime permanente;

L, f — comprimento e secção transversal da galeria;

H_o — queda útil;

λ — coeficiente.

Aceitando as hipóteses habituais para considerar o efeito da altura cinética, tem-se $\lambda = \pm 1$, consoante a chaminé se situar a montante ou a jusante da central (sendo, portanto, o efeito da altura cinética estabilizante ou destabilizante).

Neste último caso, a secção resulta infinita se for $E_o = P_o$, o que não parece aceitável, revestindo-se o esclarecimento desta questão de muita importância quando as galerias são curtas, resultando P_o próximo de E_o, como é o caso de Cabora-Bassa.

O Professor André Gardel tratara pormenorizadamente o problema da influência da altura cinética para chaminés a montante de centrais, exprimindo o valor de λ em função de parâmetros relativos às leis das perdas de carga na ligação à chaminé; realizou também vários ensaios para diferentes formas dessa ligação.

O recurso à colaboração do gabinete dirigido pelo Professor Gardel, mediante desenvolvimento teórico para obter a expressão de F_{min} e ensaios em modelo para a determinação das leis das perdas de carga na ligação das chaminés de equilíbrio de Cabora-Bassa, permitiu esclarecer devidamente a questão. Considerando as várias combinações de funcionamento das turbinas obtiveram-se em Cabora-Bassa os valores mais desfavoráveis de λ de cerca de $-0{,}20$ e $+0{,}30$, respectivamente para a chaminé com três e com duas turbinas.

5 — CENTRAL SUL

5.1 — Descrição

A potência total a instalar no aproveitamento de Cabora-Bassa é de 3600 MW, distribuída por duas centrais, uma em cada margem.

Actualmente só existe a central da margem direita, ou central sul, que é uma central subterrânea onde serão instalados cinco grupos geradores, com uma potência total de 2000 MW (Fig. 1 e 2).

A central comunica com o exterior por um poço, onde estão instalados os cabos de 220 kV, e por um túnel, que desemboca no átrio de montagem, e que foi utilizado para a construção civil e o acesso do equipamento.

A caverna da central tem, em planta, as dimensões de 217×29 m² e a sua altura, desde o fecho da abóbada até ao ponto mais baixo da fundação dos difusores, é de 59 m.

A central comporta três pisos. No principal (de nível com o átrio de montagem e à cota 206,60) encontram-se, a montante, os quadros dos grupos, alojados entre os pilares de apoio do caminho de rolamento das pontes rolantes, e, a jusante, os servomotores e os armários de comando das comportas dos difusores.

Imediatamente abaixo, à cota 202,40, existe o piso dos alternadores onde se dispõem, à volta dos poços dos alternadores, os transformadores de serviços auxiliares unitários dos grupos, incluindo a sua excitação, e os armários que contêm o equipamento de excitação estática. É também a esta cota que se fazem as saídas, em barras blindadas, que ligam os alternadores aos transformadores de grupo.

No piso inferior, à cota 198,80, encontra-se o piso das turbinas, onde se situam, à volta do maciço de apoio do estator, a cuba do óleo, as bombas do sistema de regulação, o reservatório cilíndrico do óleo e do ar comprimido do mesmo sistema, e equipamentos diversos do sistema de água de refrigeração.

Há que mencionar ainda abaixo deste piso a galeria de visita às rodas das turbinas, à cota 186,70, e a galeria de drenagem da central, à cota 173,50.

Para montante da central e desenvolvendo-se paralelamente a esta, a uma distância de 40 m entre eixos, encontra-se a galeria de transformadores, com as dimensões, em planta, de $11{,}00 \times 186$ m² e a altura de 13,40 m.

Esta galeria está separada em duas partes por uma laje, abaixo da qual se encontram os transformadores, estando a parte superior, por sua vez, subdividida em duas por uma parede: de um lado, situam-se as barras blindadas, que ligam os transformadores aos alternadores, e do outro, os cabos de 220 kV. Estes cabos seguem depois por uma galeria horizontal até à base do poço dos cabos, pelo qual sobem para o exterior. Junto à saída do poço, existe uma plataforma onde se faz a transição destes cabos a 220 kV para uma linha aérea, à mesma tensão, que termina na subestação a uma distância de cerca de 6 km. Na mesma plataforma, estão instalados também os pára-raios.

Para jusante da central e desenvolvendo-se também paralelamente a esta, a uma distância de 73,20 m entre eixos, encontram-se as duas chaminés de equilíbrio ligadas ao circuito hidráulico de jusante, sendo uma comum aos grupos, 1, 2 e 3 e outra aos grupos 4 e 5.

5.2 — Equipamentos principais

As características principais dos grupos geradores são:

— turbinas Francis de eixo vertical: potência nominal de 415 MW sob a queda útil de 103,5 m, velocidade de rotação 107,1 rpm;
— alternadores: potência aparente nominal 480 MVA, factor de potência 0,85, tensão 16 kV, P D^2 100 000 t m^2.

Os grupos têm três chumaceiras: a de impulso, para uma carga de 2400 t, montada sobre a tampa da turbina, a chumaceira-guia da turbina, alojada no interior do cone de suporte da chumaceira de impulso, e a chumaceira-guia do alternador, acima do rotor, ligada à cruzeta superior.

A roda da turbina tem um diâmetro de saída de 6560 mm e pesa 160 t.

O rotor completo pesa 920 t e o estator transmite às fundações uma carga vertical de 612 t e, em condições de curto circuito franco, aplica uma força tangencial alternada de 500 t a cada um dos doze apoios, igualmente espaçados sobre uma circunferência com o diâmetro de 15,20 m.

Os alternadores são ligados aos transformadores principais dos grupos por barras blindadas, constituídas por um condutor de alumínio com a secção de 394 cm^2 por fase e 17 300 A de intensidade nominal; as blindagens têm o diâmetro exterior de 115 cm e a secção de 360 cm^2. As perdas do conjunto das três fases, sob corrente nominal, são de 1950 W m^{-1}.

Os transformadores principais dos grupos elevam a tensão de produção (16 kV) para a de transmissão para o exterior (220 kV). São unidades monofásicas, com a potência aparente nominal de 160 MVA, associadas em bancos trifásicos, grupo de ligações Yd5 e relação de transformação $230/\sqrt{3}$ kV $\pm$ 5 %/16 kV. São arrefecidas em permutadores de calor óleo-água e o peso de cada unidade, incluindo o óleo, é de 130 t.

Os cabos a 220 kV, que transmitem a potência gerada para o exterior, são de cobre, com óleo sob pressão. A sua secção nominal é de 1000 mm^2 e o diâmetro nominal exterior do cabo é de 100 mm. As perdas totais por fase são de 48 W m^{-1}.

A central está equipada com duas pontes rolantes de 500 t cada, com travessão de acopulamento para o levantamento do rotor do alternador.

5.3 — Alguns problemas postos ao projectista das instalações

5.3.1 — Condições de elaboração do projecto de execução

Os desenhos de execução da construção civil deveriam ser entregues com seis meses de avanço em relação ao início da execução programado pelo empreiteiro, o que por vezes, pôs problemas pela falta de desenhos-guia dos fornecedores do equipamento ou pelas correcções que estes posteriormente introduziram nos mesmos.

Houve por isso necessidade de, por diversas vezes, introduzir alterações ao projecto de execução e de proceder a cálculos de verificação para condições de solicitação das estruturas diferentes das inicialmente consideradas.

5.3.2 — Escavação da caverna da central e das chaminés de equilíbrio

As grandes dimensões destas cavernas, a sua posição relativa e as tensões internas, relativamente altas, medidas no maciço rochoso, exigiram cuidado especial no estudo das tensões do maciço à sua volta.

Tal estudo foi levado a efeito pelo método dos elementos finitos, [3], tendo-se em consideração as várias fases de escavação.

As Fig. 3 e 4 representam as tensões principais no maciço rochoso relativas ao fim da 1.ª fase das escavações da central e da escavação final.

5.3.3 — Montagem das blindagens dos difusores

Para estrutura de apoio dos caminhos de rolamento das pontes rolantes da central foi prevista uma série de pórticos de dois tramos a cujo estudo foi também aplicado o método dos elementos finitos, [3].

As pontes rolantes foram utilizadas para montagem das blindagens dos difusores, numa altura em que o pilar central dos referidos pórticos, do lado de jusante, não tinha apoio, porque os betões de envolvimento das blindagens não existiam ainda. Por outro lado, devido a atrasos na execução dos betões da fundação dos pilares, ficaram estes, provisoriamente, com uma altura sensivelmente tripla da correspondente às condições finais para as quais tinham sido calculados.

Para possibilitar a utilização das pontes nestas condições houve que criar um apoio ao pilar central, com uma viga que vencesse o vão do difusor.

Houve também que fazer um cálculo de verificação dos pórticos para ter em conta o aumento da altura dos pilares nesta fase da construção.

5.3.4 — Fundações dos grupos geradores

A necessidade de diminuir as escavações da caverna da central e o comprimento dos veios dos grupos e a adopção da disposição das chumaceiras atrás referida conduziram a dimensões muito reduzidas para as estruturas de suporte dos grupos, o que foi ainda agravado pela existência, entre os apoios do estator, dos orifícios do circuito de ventilação dos alternadores, que reduziram as secções de betão nessa zona.

Estes condicionamentos e os valores extremamente elevados das solicitações impuseram a necessi-

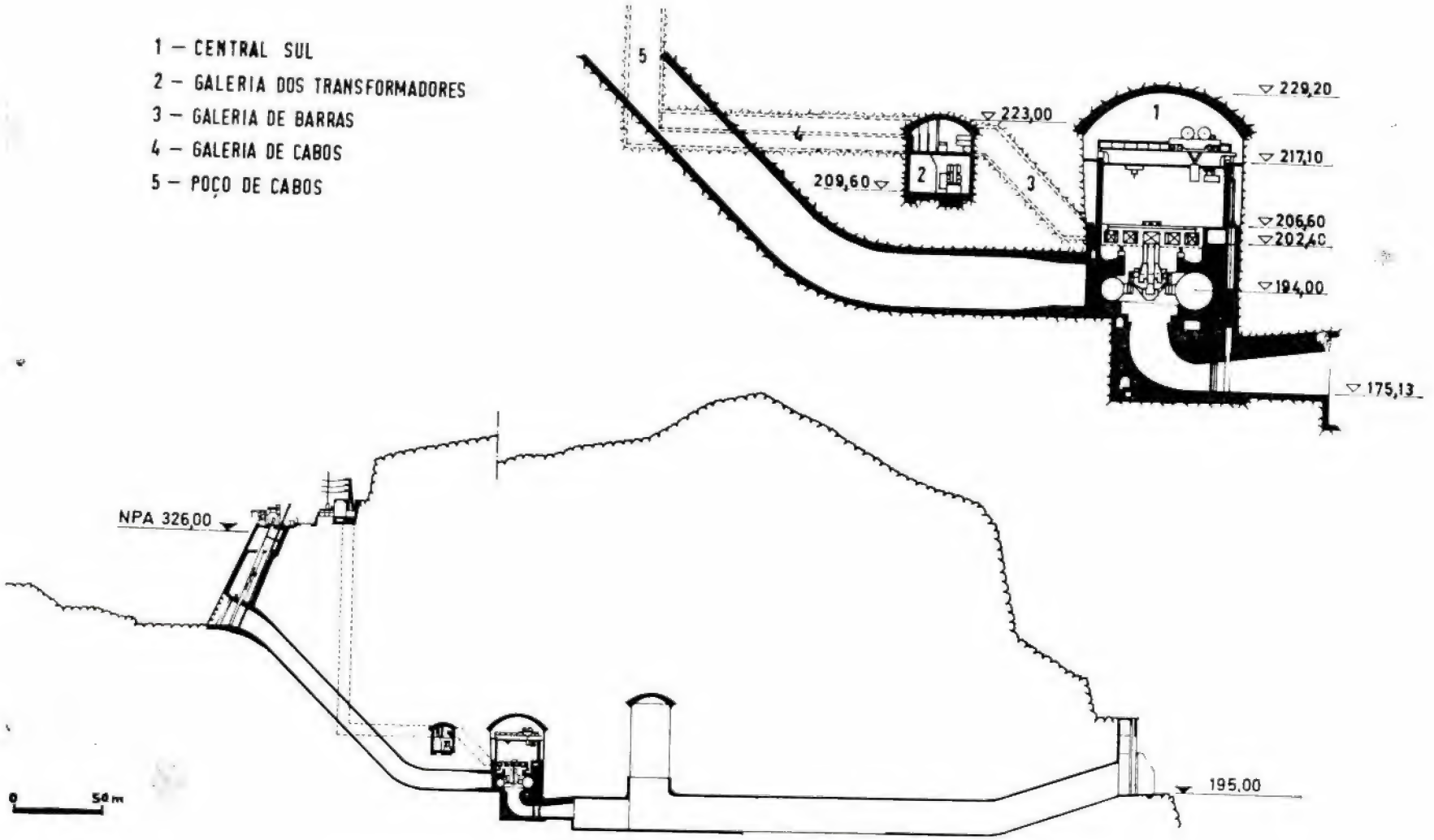


Fig. 2
Perfil longitudinal do circuito hidráulico e corte da central sul e da galeria dos transformadores

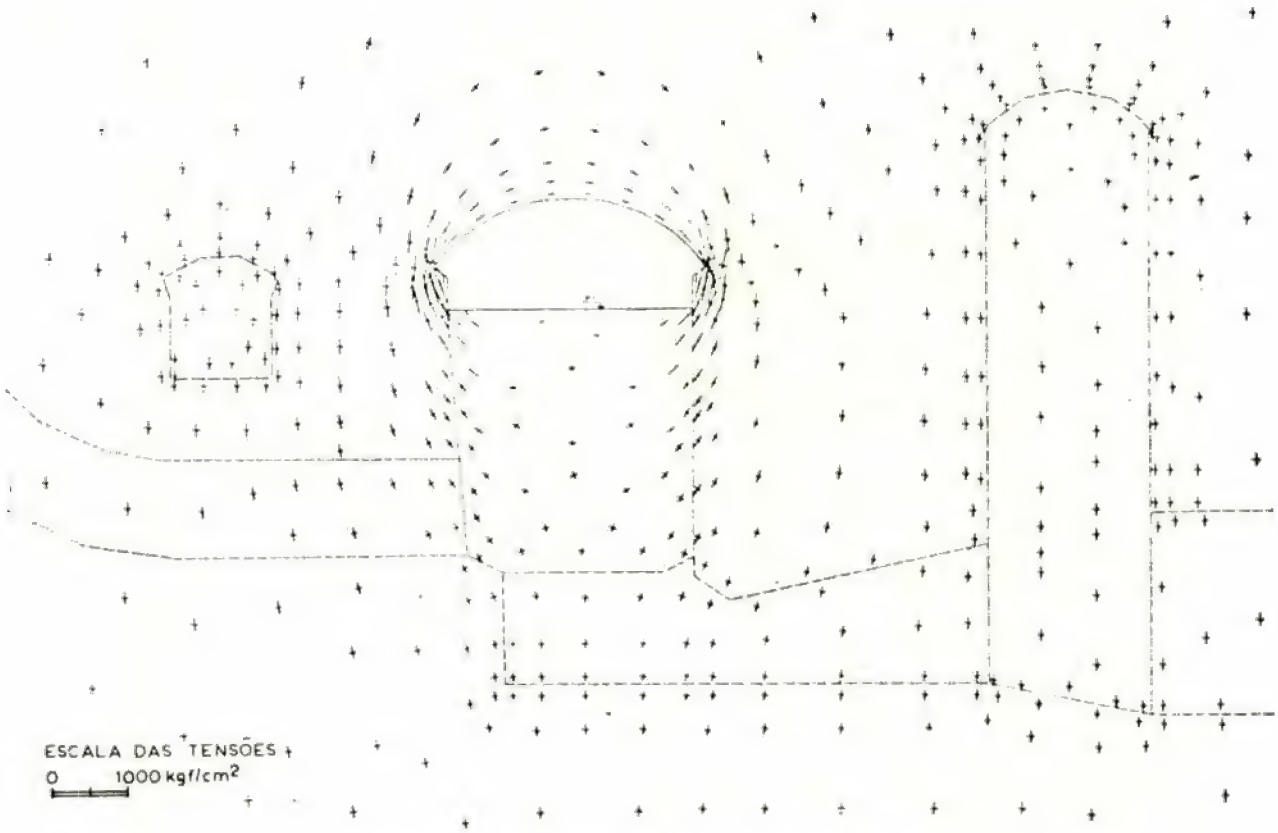


Fig. 3
Tensões principais no maciço rochoso. 1.ª fase de escavação

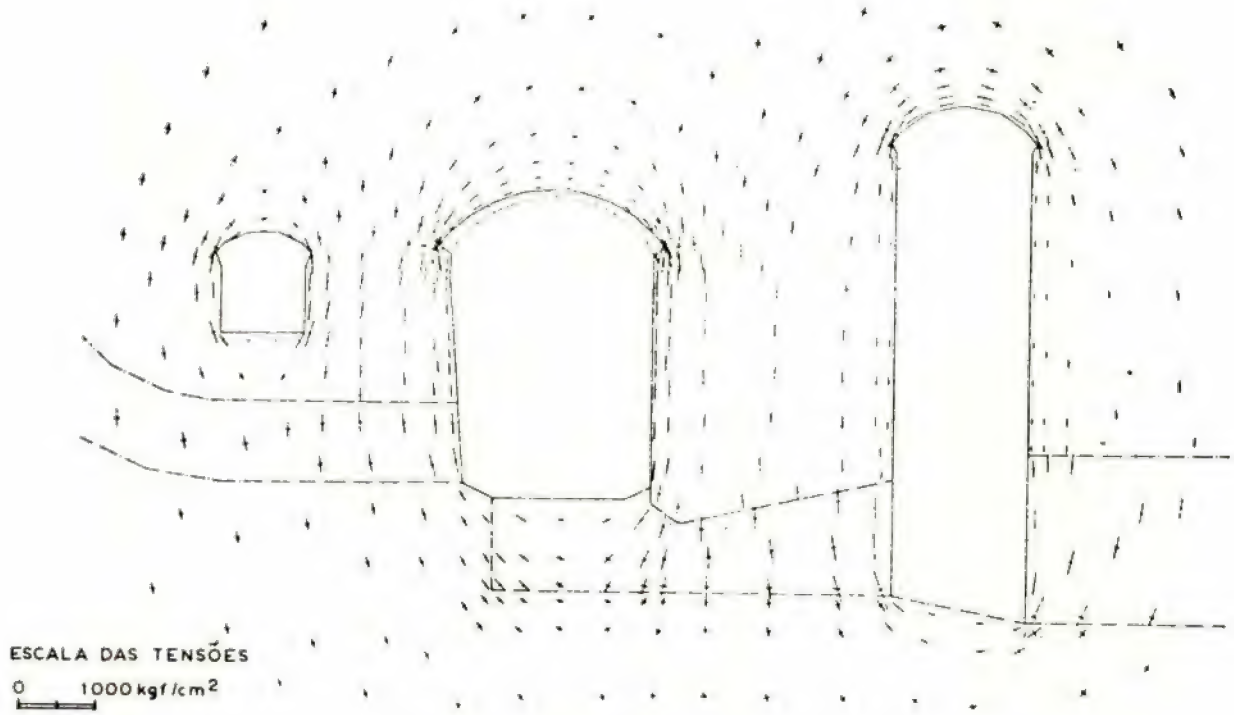


Fig. 4
Tensões principais no maciço rochoso. Escavação final

dade de se proceder a um estudo cuidado dos esforços e deformações a que ficam sujeitas as estruturas de apoio, o que foi também feito por aplicação do método dos elementos finitos, [4].

Do estudo concluiu-se que teria havido vantagem em poder ancorar a armadura radial dos betões de envolvimento da espiral aos anéis superior e inferior do antedistribuidor da turbina o que, no entanto, não se fez por tal hipótese não ter sido considerada na fase de projecto do antedistribuidor e não ser já possível modificá-lo.

Relativamente aos apoios do estator, constituídos por peças prismáticas, normalmente apenas embebidas no betão, o cálculo mostrou a necessidade de amarrar as peças de apoio ao betão, de forma a garantir pequena deformabilidade ao conjunto. Assim, o fornecedor dos alternadores dotou estas peças de barras soldadas às quais se ligaram as armaduras, cujo dimensionamento foi especialmente cuidado dada a natureza das solicitações e valores que podem atingir e o facto de a zona ser vasada.

5.3.5 — Qualidade da água

O facto de a água ser tomada numa grande albufeira, situada num país tropical e numa zona de abundante vegetação, levou a adoptar cuidados especiais na especificação dos sistemas de refrigeração.

Com efeito, estas condições são propícias, pelo menos numa primeira fase da existência da albufeira, ao desenvolvimento de ácido sulfídico e ao aparecimento de algas e microrganismos que podem dar lugar a problemas graves de corrosão e diminuição do rendimento dos permutadores de calor dos sistemas de refrigeração.

Assim, foram estabelecidas especificações bastante rigorosas para a protecção contra a corrosão e foi previsto um sistema de injecção de cloro, com doseamento ajustável, imediatamente a jusante da válvula da tomada de água de refrigeração de cada um dos grupos.

BIBLIOGRAFIA

[1] **Ferreira dos Santos, J.** — Aproveitamento hidroeléctrico de Cabora-Bassa. Dimensionamento hidrológico dos órgãos de descarga. Electricidade, n.os 54 e 55, 1968, Lisboa.

[2] **Abecasis, F. M.; Quintela, A. C.; Henriques, R. G.; Santos, L. M.** — Temporary river diversion. The case of Cabora-Bassa. Onzième Congrès des Grands Barrages, Q 34, Vol. 4, 1973, Madrid.

[3] **Salvador Fernandes, J.; Esteves Ferreira, M. J.; Molico, A. A.** — Versatilidade do método dos elementos finitos para estados planos de tensão ou de deformação. Aplicações diversas no aproveitamento de Cabora-Bassa. Electricidade, n.º 77, 1972, Lisboa.

[4] **Cruz, A. A.; Esteves Ferreira, M. J.; Oliveira Cymbron, J. M.** — Problemas de dimensionamento das estruturas de suporte dos grupos da central de Cabora-Bassa, Electricidade, n.º 90, 1973, Lisboa.

NOTICIÁRIO

• Programa da F. I. L. para 1978

O programa da FIL (Feira Internacional de Lisboa) para o ano corrente conta com oito certames (de grande envergadura) já assegurados, dos quais cinco são de nível internacional e três de âmbito nacional.

O mais importante — segundo um porta-voz da FIL — será a 19.ª Feira Internacional de Lisboa, que decorrerá de 1 a 10 de Junho. Simultaneamente, realizar-se-á o 1.º Salão Internacional de Metalurgia, Metalomecânica e Electricidade e Electrónica Industriais.

O programa de actividades da FIL será aberto com o 1.º Salão Internacional das Indústrias Gráficas, do Livro e do Material Didáctico, que estará patente de 10 a 19 de Fevereiro. Seguem-se o 1.º Salão do Pronto-a-Vestir e do Calçado, de 14 a 19 de Março; e o 1.º Salão Internacional do Turismo, de Hotelaria e do Desporto, de 14 a 23 de Abril, seguindo-se o 2.º Salão do Mobiliário, da Decoração, da Iluminação e dos Artigos Domésticos, e bem assim o 2.º Salão Internacional da Agricultura e Indústrias Afins e o 1.º Salão da Vinha e do Vinho.

(Informação do «Jornal de Notícias», de 22-1-78)

NÚMERO 445/446 DEZEMBRO 1977/JANEIRO 1978 ANO LII/LIII VOLUME XXXIX

C. D. U. 621.313.12:519.28

Estados de avaria parcial de grupos em estudos de reserva girante

M. FERREIRA DE OLIVEIRA (1)
J. REIS CARDOSO (2)

RESUMO

A fixação da reserva girante feita em termos probabilísticos tem por objectivo garantir que a probabilidade da carga exceder a potência disponível não é superior a um valor fixado como admissível.

Estudos desta natureza fazem-se conhecendo as probabilidades, como função do tempo, dos grupos do sistema se encontrarem nos «estados» em que podem residir; a cada um dos possíveis estados em que um grupo pode residir está associada uma potência máxima que o grupo é capaz de produzir.

O presente trabalho apresenta uma metodologia que permite calcular as referidas probabilidades visando a sua utilização em estudos de fixação da reserva girante de um sistema electroprodutor.

SUMMARY

Spinning reserve studies including reliability techniques allow the risk evaluation, i.e. the probability of the system load exceeding the system capacity.

This studies require the knowledge of the individual probabilities of each of the generator states; catch state is defined by the maximun capacity the generator is able to produce.

This paper presents a technique to evaluate each of the individual probabilities, as a function of time, of the generator states required in spinning reserve studies.

1 — INTRODUÇÃO

A aplicação de métodos probabilísticos a estudos de sistemas eléctricos de energia iniciou-se já há cerca de 30 anos. A grande maioria dos estudos desenvolvidos têm estado associados a técnicas de expansão de sistemas geradores, podendo hoje afirmar-se que existem algoritmos publicados que permitem a análise de diferentes alternativas de expansão de um qualquer sistema gerador com tempos de computação aceitáveis por qualquer utilizador.

O primeiro trabalho significativo que introduz técnicas probabilísticas em estudos de fixação de reserva girante num sistema produtor foi publicado em 1963 [1]; em 1965 uma outra publicação [2] ilustra a aplicação das técnicas descritas em [1] a um sistema produtor com dimensões médias. Após esta segunda publicação têm surgido as mais variadas contribuições, cada uma delas aperfeiçoando ou tentando expandir conceitos e técnicas anteriormente publicados. Um capítulo do livro indicado como referência [3] sintetiza os conceitos fundamentais envolvidos em estudos de fixação de reserva girante de sistemas produtores.

Várias publicações referindo estudos de fixação de reserva girante consideram, para cada grupo produtor, mais do que os seus dois «estados» fundamentais. Assim cada grupo, para além de se poder encontrar no estado de funcionamento pleno ou no de avaria, pode encontrar-se em funcionamento embora sem possibilidade de produzir a sua potência máxima, correspondendo-lhe um estado de avaria parcial definido pela percentagem da potência máxima que o grupo pode produzir.

No presente trabalho apresenta-se uma metodologia possível para o cálculo da evolução no tempo da probabilidade de um grupo se encontrar em cada um dos seus possíveis «estados», incluindo os estados de avaria parcial.

(1) Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
(2) Assistente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
Comunicação apresentada ao Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

2 — DADOS NECESSÁRIOS EM ESTUDOS DE FIXAÇÃO DE RESERVA GIRANTE

Enquanto que em estudos de expansão de sistemas produtores é necessário conhecer para cada grupo a probabilidade estacionária (i. e., calculada para $t=\infty$) do grupo residir em cada um dos seus possíveis estados, em estudos de fixação de reserva girante precisamos de conhecer as mesmas probabilidades mas como função do tempo.

Ao realizarmos estudos de expansão pensamos em tempos da ordem dos 5, 10 ou mais anos, o que nos permite utilizar probabilidades estacionárias. Em estudos de fixação de reserva girante conhecemos num dado instante, $t=0$, a configuração do sistema e desejamos prever o seu comportamento no futuro imediato, digamos dentro de 4 horas; volvidas as quatro horas referidas conhecemos novamente, em termos determinísticos, a configuração do sistema pelo que consideramos $t=0$ e repetimos o estudo. O tempo durante o qual pretendemos conhecer a evolução do risco probabilístico do sistema é função do grau de precisão com que conseguimos prever o andamento da curva de cargas e do tempo de resposta de grupos que não estão «em reserva» e que poderão substituir total ou parcialmente um grupo que avarie.

Em estudos desta natureza admite-se que no sistema (ou recorrendo a interligações com outros sistemas) existe sempre potência instalada capaz de alimentar qualquer carga possível. Portanto, o risco que se calcula representa apenas a probabilidade da carga exceder a potência imediatamente disponível, admitindo-se que a perda da carga se verifica apenas durante o tempo de resposta de novos grupos. Se conseguirmos calcular uma expressão para a probabilidade do grupo residir em cada um dos seus possíveis estados como função do tempo, $P_i(t)$, a partir do conhecimento da «história» do grupo poderemos realizar todos os tipos de estudos associados à fixação da reserva girante. Admitimos que conhecemos o andamento da curva de cargas bem como as características da distribuição (geralmente a distribuição normal) associada a cada ponto da curva de cargas.

A «história» de um grupo é o conjunto de informações que nos permitem conhecer os tempos de residência do grupo em cada um dos seus estados, bem como a frequência de ocorrência de cada um de tais estados. A figura 1 representa o que podemos considerar a «história» de um grupo, representando $t=0$ o instante em que o grupo foi inicialmente posto em funcionamento; omitem-se os períodos de manutenção porque se tratam de períodos da história do grupo em que se conhece «a priori» que o grupo não irá produzir energia.

Consideremos com algum detalhe as informações contidas na Fig. 1. Os quatro estados nela referidos poderão representar a capacidade do grupo funcionar à plena carga (A), a avaria total do grupo (D), correspondendo aos estados B e C a ocorrência de avarias que impossibilitam o grupo de produzir mais do que, por exemplo, 90 % e 70 % da sua capacidade nominal. A probabilidade estacionária de encontrarmos o grupo, num qualquer instante em que o grupo não está sob manutenção, nos seus possíveis estados é dada por:

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} t_{Ai}}{T}$$ onde n_A = n.º de vezes que o estado A ocorreu durante o tempo T

$$P_B = \frac{\sum_{i=1}^{n_B} t_{Bi}}{T}$$ onde n_B = n.º de vezes que o estado B ocorreu durante o tempo T

$$P_C = \frac{\sum_{i=1}^{n_C} t_{Ci}}{T} \text{ e } P_D = \frac{\sum_{i=1}^{n_D} t_{Di}}{T}$$, onde n_c e n_d têm significado idêntico a n_A e n_B.

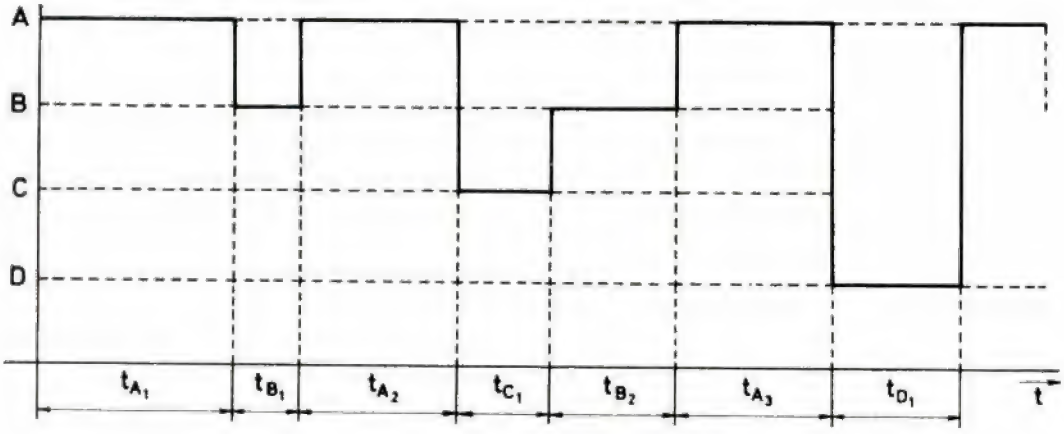


Fig. 1
Representação gráfica da história de um grupo com possibilidade de residência em 4 estados A, B, C e D

Atendendo a que

$$\sum_{i=1}^{n_A} t_{Ai} + \sum_{i=1} t_{Bi} + \sum_{i=1} t_{Ci} + \sum_{i=1}^{n_D} t_{Di} = T$$

teremos que $P_A + P_B + P_C + P_D = 1.0$ tal como sabemos ter que se verificar, uma vez que a ocorrência de um dos estados implica a não ocorrência de qualquer outro estado.

Nas secções seguintes procuraremos apresentar as técnicas analíticas que nos permitem calcular $P_A(t)$, $P_B(t)$, $P_C(t)$ e $P_D(t)$ a partir dos dados contidos na fig. 1.

O tempo médio de residência em cada um dos estados é dado por

$$t_{m0} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{0i}}{n} \quad e \qquad t_{m1} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{1i}}{n},$$

podendo inferir-se que o número de transições por unidade de tempo do estado 0 para o estado 1 é dado por $1/t_{m0}$ e que o número de transições por unidade de tempo do estado 1 para o estado 0 é dado por $1/t_{m1}$.

Num processo de Markov ao número de transições por unidade de tempo do estado i para o estado j, T_{ij}, chama-se taxa de transição do estado i para o estado j. No caso de um grupo com apenas dois

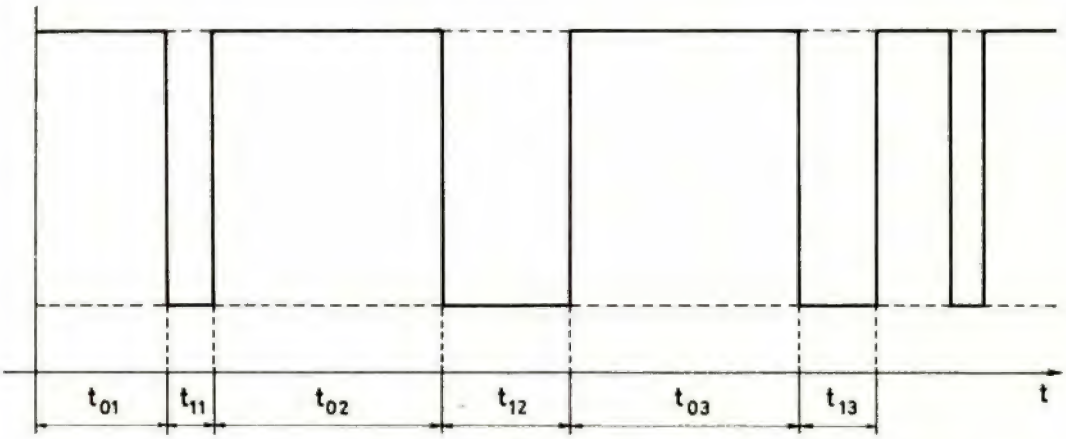


Fig. 2
Representação gráfica da história de um grupo com 2 estados possíveis de residência

3 — CONCEITOS BÁSICOS DE PROCESSOS DE MARKOV

Consideremos um grupo com apenas dois estados de residência: o estado de funcionamento à plena carga (estado 0) e o estado de avaria (estado 1).

Na figura 2 os valores t_{0i} com $i=1,n$ assim como os valores t_{1i}, com $i=1,n$ constituem conjuntos de variáveis aleatórias.

A experiência tem demonstrado que a função de densidade de probabilidade que melhor se ajusta a tais conjuntos de variáveis aleatórias é a f.d.p. associada à distribuição exponencial. Diremos, então que a distribuição dos tempos de funcionamento do grupo é exponencial assim como o é também a distribuição dos tempos de reparação. Aceitando tal premissa podemos imediatamente concluir que o processo de transição entre os dois estados é um processo de Markov uma vez que a probabilidade do grupo transitar de um estado para o outro é independente do tempo de residência no estado anterior à transição.

estados as duas taxas de transição que lhe estão associadas são conhecidas por taxa de avarias e taxa de reparação, sendo para o exemplo considerado na fig. 2

λ (taxa de avaria) $= 1/t_{m0}$

μ (taxa de reparação) $= 1/t_{m1}$

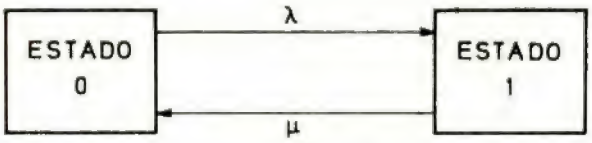


Fig. 3
Representação dos estados associados ao grupo cuja história é dada pela Fig. 2

Definindo

$P_0(t)$ = probabilidade do grupo se encontrar no estado 0 no instante t.

$P_1(t)$ = probabilidade do grupo se encontrar no estado 1 no instante t.

Podemos escrever:

$$P_0(t + dt) = P_0(t)\ (1 - \lambda\ dt) + P_1(t)\ (\mu\ dt)$$
$$P_1(t + dt) = P_1(t)\ (1 - \mu\ dt) + P_0(t)\ (\lambda\ dt) \qquad (1)$$

ou ainda

$$P'_0(t) = -\lambda\ P_0(t) + \mu\ P_1(t)$$
$$P'_1(t) = -\mu\ P_1(t) + \lambda\ P_0(t) \qquad (2)$$

O sistema de equações diferenciais anterior pode representar-se sob a forma matricial

$$\begin{bmatrix} P'_0(t) \\ P'_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \end{bmatrix} \qquad (3)$$

Resolvendo o sistema de equações diferenciais (3) e admitindo que $P_0(0) = 1$ e $P_1(0) = 0$, isto é, no instante $t=0$ considerou-se que o grupo não estava avariado, teremos:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda\, e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda+\mu} \qquad (4)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda\, e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda+\mu}$$

Notemos que quando $t \to \infty$ as equações (4) dão-nos as probabilidades estacionárias correspondentes a cada um dos estados

$$P_0(\infty) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = \frac{t_{m0}}{t_{m0}+t_{m1}}$$

$$P_1(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} = \frac{t_{m1}}{t_{m0}+t_{m1}}$$

Consideremos um grupo residindo em três estados, sendo um correspondente ao funcionamento normal (estado 1), outro correspondente a uma avaria que impede o grupo de funcionar a mais de 80 % da plena carga (estado 2) e um outro associado ao estado de avaria total do grupo (estado 3). A figura 4 representa o diagrama dos estados possíveis de um tal grupo.

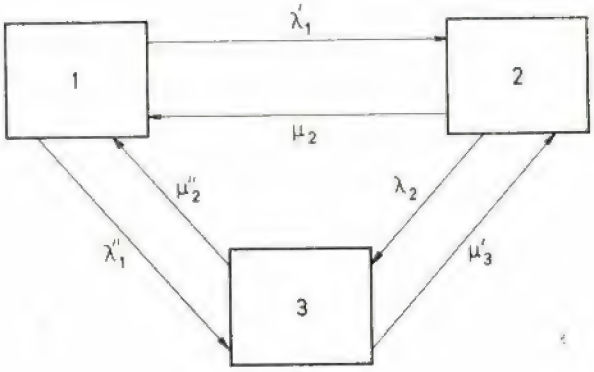


Fig. 4
Diagrama dos estados possíveis de um grupo com um estado de avaria parcial possível

A partir do diagrama da fig. 3 pode, por simples inspecção, escrever-se o sistema de equações que, uma vez resolvido, nos dá as probabilidades de o grupo residir em cada um dos estados como função do tempo

$$\begin{bmatrix} P'_1(t) \\ P'_2(t) \\ P'_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda'_1+\lambda''_1) & \mu_2 & \mu''_3 \\ \lambda'_1 & -(\mu_2+\lambda_2) & \mu_3 \\ \lambda''_3 & \lambda_2 & -(\mu''_3+\mu'_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} \qquad (5)$$

Consideremos agora a «história» do grupo com 3 estados possíveis associado à representação indicada na fig. 4.

Suponhamos que o grupo residiu n_1 vezes no estado 1, n_2 vezes no estado 2 e n_3 vezes no estado 3. Teremos então que:

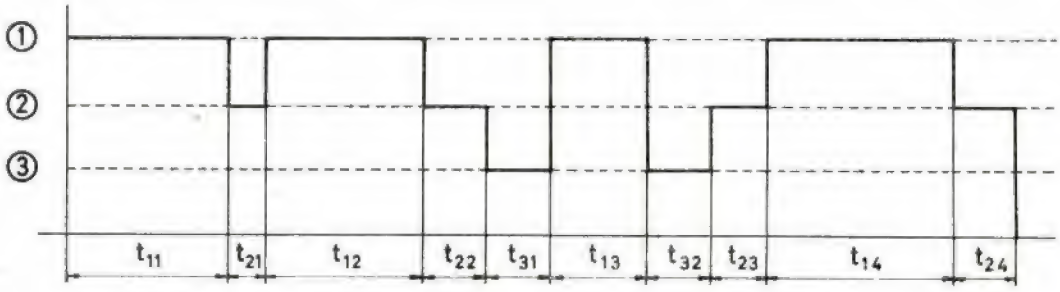


Fig. 5
«História» do grupo associado ao diagrama representado na fig. 4

$$t_{m1} \text{ (tempo médio de residência no estado 1)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} t_{1i}}{n_1}$$

$$t_{m2} \text{ (tempo médio de residência no estado 2)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} t_{2i}}{n_2}$$

$$t_{m3} \text{ (tempo médio de residência no estado 3)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} t_{3i}}{n_3}$$

Dissemos já que o inverso do tempo médio de residência no estado i é igual à taxa de abandono do estado i; no exemplo presente a taxa de abandono do estado i (i=1, 2, 3) é decomposta em 2 taxas de transição. Vejamos como calcular cada uma das taxas de transição associada ao estado i.

Suponhamos i=1, sendo válida para qualquer dos outros 2 estados a metodologia a seguir exposta.

Sabemos que

$$\lambda_1 = \frac{1}{t_{m1}} = \lambda_1' + \lambda_1''$$

e desejamos conhecer λ_1' e λ_1''. Seja n_{12} o número de transições observadas do estado 1 para o estado 2 e n_{13} o número de transições observadas do estado 1 para o estado 3. Façamos $\delta(i)=0$ quando o intervalo de tempo t_{1i} acaba com uma transição do estado 1 para o estado 2 e $\delta(i)=1$ quando t_{1i} termina com uma transição do estado 1 para o estado 3.

Do mesmo modo façamos $\gamma(i)=0$ quando o intervalo de tempo t_{1i} acaba com uma transição do estado 1 para o estado 3 e $\gamma(i)=1$ quando t_{1i} termina com uma transição do estado 1 para o estado 2.

É fácil verificar-se que:

$$t'_{m1} = \frac{1}{\lambda'_1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} t_{1i}\,\delta(i)}{n_{12}}$$

(t'_{m1} tempo médio de residência no estado 1 antes de transitar para o estado 2)

$$t''_{m1} = \frac{1}{\lambda''_1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} t_{1i}\,\gamma(i)}{n_{13}}$$

(t''_{m1} tempo médio de residência no estado 1 antes de transitar para o estado 3)

Acabamos de verificar que conhecendo a «história» de um grupo é possível calcular-se a probabilidade, como uma função do tempo, de o grupo se encontrar em qualquer dos seus estados possíveis. Para a resolução de sistemas equivalentes ao indicado por (5) é necessário conhecer-se o vector p(0) correspondente ao estado inicial. Assim, se admitirmos que quando t=0 o grupo se encontra no estado 1, teremos que $p(0) = [1 \quad 0 \quad 0]^t$.

4 — CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE RESIDÊNCIA NOS DIFERENTES ESTADOS

O número de estados em que um grupo pode residir é essencialmente função da complexidade e da estrutura dos correspondentes sistemas auxiliares.

Conhecem-se os esforços que têm vindo a ser feitos [6] no sentido de diminuir a indisponibilidade total e/ou parcial de um grupo projectando os serviços auxiliares segundo critérios que levem à minimização de tal indisponibilidade. É sobretudo com grupos térmicos convencionais de elevada capacidade e com grupos nucleares que se torna cada vez mais necessário recorrer a estudos deste tipo.

Não é difícil imaginar-se, por exemplo, um grupo térmico com 10 ou 20 possíveis estados de residência. Geralmente a cada um destes estados não corresponde uma capacidade máxima de produção diferente. Nestas circunstâncias é possível aglutinar num só estado todos os estados que, embora causados por acontecimentos diferentes, provoquem uma redução equivalente na capacidade do grupo. Mesmo com a metodologia indicada há grupos que podem residir num número de estados consideravelmente superior a 3.

Dissemos já que em estudos de fixação de reserva girante precisamos de conhecer a probabilidade de um grupo residir em cada um dos seus possíveis estados como função do tempo. Vimos na secção anterior que com o conhecimento da «história» do grupo é possível representar o diagrama dos possíveis estados do grupo e calcular as taxas de transição entre os diferentes estados. O problema que pretendemos resolver consistirá, então, em resolver um sistema de equações diferenciais do tipo indicado por (5), isto é, com a forma $p'(t) = S\ p(t)$, onde

$$p'(t) = [P'_1(t)\ ,\ P'_2(t)\ ,\ \ldots\ldots\ P'_n(t)]^t$$

$$p(t) = [P_1(t)\ ,\ P_2(t)\ ,\ \ldots\ldots\ P_n(t)]^t$$

S — matriz quadrada de ordem n×n e tal que

$$\sum_{j=1}^{n} S_{ij} = 0$$

sendo S_{ij} $(i \neq j)$ = taxa de transição do estado j para o estado i

Com a resolução do sistema de equações diferenciais acima referido obtemos o que chamaremos «solução correcta».

Em termos computacionais a obtenção de «soluções correctas» é ineficiente quando comparada com soluções aproximadas que contêm um erro desprezável quando comparadas com os erros associados aos dados utilizados. Apresentaremos a seguir dois métodos possíveis para o cálculo do vector p(t) e, através de um exemplo académico, faz-se referência a valor dos erros introduzidos com as simplificações aconselhadas por razões de eficiência computacional.

4.1 — Matriz Estocástica de Transição de Probabilidades

As dificuldades associadas ao «método exacto» resultam do facto de o tempo ser uma variável contínua e, portanto, a transição de um grupo de um estado para qualquer outro estado pode verificar-se em qualquer instante. Se considerarmos que a transição entre estados só se pode realizar no fim de determinados intervalos de tempo, o que equivale a acumular as transições verificadas em $[t, t+\Delta t]$ no instante $t+\Delta t$, tal é equivalente a considerar o tempo como uma variável discreta.

A teoria de Markov para processos estocásticos com variáveis discretas não apresenta qualquer dificuldade de implementação algorítmica. Estabelecida a matriz estocástica de transição de probabilidades associada a um intervalo de tempo Δt, — designada por T — e conhecido o vector que representa as probabilidades de residência nos estados possíveis no instante t, p(t), teremos

$$p(t + \Delta t) = T\, p(t) \qquad (6)$$

A expressão (6) pode ser usada para qualquer valor de t, sendo constante e apenas dependente de Δt. Recorrendo à expressão (6) poderemos conhecer a evolução das probabilidades de residência nos estados possíveis:

$$P\,(1 \,.\, \Delta t) = T\, p(0)$$
$$P\,(2 \,.\, \Delta t) = T\, p(\Delta t) = T^2\, p(0)$$
$$P\,(3 \,.\, \Delta t) = T\, p(2\,\Delta t) = T^3\, p(0)$$

$$\vdots$$

$$P\,(n\,\Delta t) = T^n\, p(0)$$

Estabelece-se a seguir a matriz estocástica de transição das probabilidades para um grupo com 2 estados possíveis e para um intervalo de tempo t = 1 h

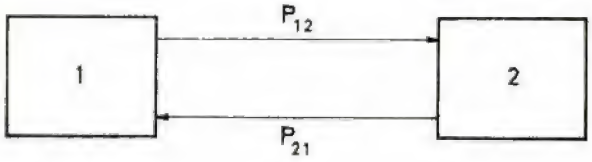


Fig. 6
Cálculo da matriz estocástica de transição das probabilidades

Na fig. 6 P_{ij} representa a probabilidade de transição do estado i para o estado j durante 1 hora ($\Delta t = 1$ h). Teremos então:

$P_1(n)$ [probabilidade de residência no estado 1 ao fim de n horas] $= P_1\,(n-1)\,(1-P_{12}) + P_2\,(n-1)\,P_{21}$

$P_2(n)$ [probabilidade de residência no estado 2 ao fim de n horas] $= P_2\,(n-1)\,(1-P_{21}) + P_1\,(n-1)\,P_{12}$

ou seja:

$$\begin{bmatrix} P_1\,(n) \\ P_2\,(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-P_{12} & P_{21} \\ P_{12} & 1-P_{21} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1\,(n-1) \\ P_2\,(n-1) \end{bmatrix}$$

mas porque a probabilidade de transição do estado 1 para o estado 2 durante Δt é aproximadamente igual a $\lambda \,.\, \Delta t$ e, do mesmo modo, a probabilidade de transição do estado 2 para o estado 1 durante Δt é $\mu\,\Delta t$, teremos que

$$\underset{(\Delta t\,:\,1\,h)}{T} = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \mu \\ \lambda & 1-\mu \end{bmatrix}$$

De um modo geral teremos que T_{ij} $(i \neq j)$ para $\Delta t = 1$ h é igual à taxa de transição do estado j para o estado i, e $\sum_{j=1}^{n} T_{ij} = 1$

4.2 — Método com aproximações no diagrama dos estados possíveis

Em estudos de fixação de reserva girante precisamos de conhecer as probabilidades, como função do tempo, do grupo residir em cada um dos seus estados possíveis mas apenas para t menor ou igual ao tempo necessário para se substituir a potência que, por força de avaria verificada, se deixa de produzir.

Um valor típico máximo para t é de 8 horas, sendo a maioria dos estudos feitos para t = 4 horas. De qualquer modo para os valores de t em questão

é válida a hipótese simplificativa que considera que se uma avaria ocorre não é possível a sua reparação no intervalo de tempo de interesse para o nosso estudo; tal simplificação conduz a um diagrama de estados possíveis do tipo do representado na Fig. 8 relativa ao exemplo apresentado em 4.3.

A Fig. 9 relativa ao mesmo exemplo incorpora uma outra simplificação complementar: admite-se que no intervalo em consideração a probabilidade de se verificarem duas ou mais transições entre os estados possíveis é desprezável. Salienta-se a simplicidade do diagrama dos estados possíveis quando se aceitam as simplificações referidas. O exemplo apresentado em 4.3 confirma a validade dos princípios simplificativos enunciados.

4.3 — Exemplo comparativo

Consideremos um grupo para o qual apenas se considera um estado de avaria parcial. Na fig. 7 indica-se o correspondente diagrama dos estados possíveis

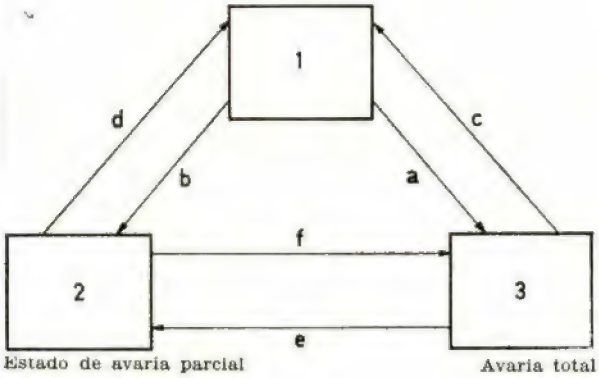


Fig. 7
Diagrama dos estados possíveis de um grupo com um estado de avaria parcial

Admitiu-se que as taxas de transição calculadas em avarias/hora são as seguintes:

a = 0.0003	b = 0.0010
c = 0.0225	d = 0.0350
e = 0.0008	f = 0.0004

As Figuras 8 e 9 representam 2 diagramas dos estados possíveis com as simplificações justificadas nas subsecções anteriores.

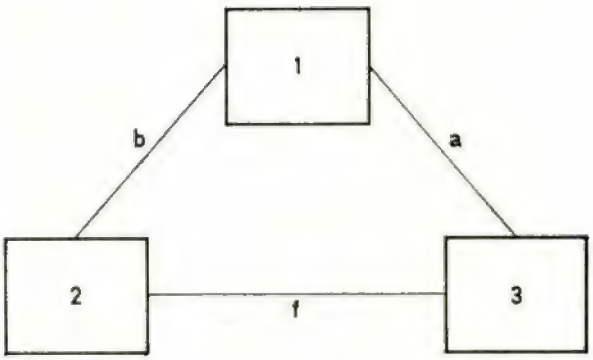


Fig. 8
Diagrama dos estados possíveis considerando apenas taxas de avaria

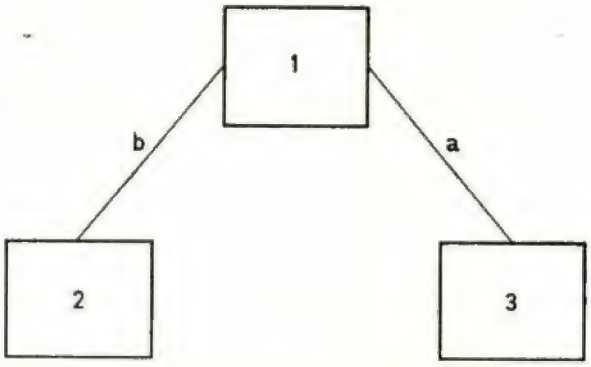


Fig. 9
Diagrama dos estados possíveis considerando apenas taxas de transição entre os valores 1 2 e 1 3

Nos quadros A e B indicam-se os resultados obtidos considerando t = 1 hora e t = 4 horas. A análise dos resultados apresentados permite-nos concluir que com o aumento de t decresce a precisão dos métodos aproximados sendo, contudo, válidas qualquer das aproximações para t=4 horas (tempo típico utilizado em estudos de reserva girante).

5 — CONCLUSÕES

No presente trabalho sintetizam-se as técnicas necessárias para a preparação dos dados necessários em estudos de fixação da reserva girante num sistema electroprodutor.

Pretende-se com este trabalho contribuir para que tais estudos sejam feitos no nosso país e entendeu-se ser o problema abordado uma das razões que podem retardar o desenvolvimento de estudos deste tipo. A introdução de estados de avaria parcial passou a considerar-se como um aperfeiçoamento em métodos existentes, que se não justifica simplificar, a partir de 1970 [4], [5]. Os trabalhos já publicados neste domínio provam os benefícios que se podem conseguir com estudos desta natureza.

QUADRO A

Probabilidades de residências nos 3 estados para t=1 horas

Método usado	Estado de funcionamento pleno	Estado de avaria parcial	Estado de avaria total
Exacto	0.99872147	0.00098199	0.00029654
Matriz ($\triangle$ t=1 h)	0.9987	0.001	0.0003
Aproximado (Fig. 8)	0.9987	0.001	0.0003
Aproximado (Fig. 9)	0.9987	0.001	0.0003

QUADRO B

Probabilidades de residência nos 3 estados para t=4 horas

Método usado	Estado de funcionamento pleno	Estado de avaria parcial	Estado de avaria total
Exacto	0.99513217	0.00372199	0.00114584
Matriz ($\triangle$ t=1 h)	0.99505	0.00378	0.00116
Aproximado (Fig. 8)	0.9948	0.0040	0.0012
Aproximado (Fig. 9)	0.9948	0.0040	0.0012

REFERÊNCIAS

[1] **L. T. Anstine, R. E. Burke, J. E. Casey, R. Holgate, R. S. John e H. G. Stewart** — «Aplication of Probability Methods to the Determination of Spinning Reserve Requirements for the Pennsylvannia — New Jersey — Maryland Interconnection», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS -82, pp. 726-735, Outubro, 1963.

[2] **R. Billinton and M. P. Musick,** «Spinning Reserve Criteria in a Hydro Thermal System by the Application of Probability Mathematics», Journal of the Engineering Institute of Canada, Vol. 48, pp. 40-50, Outubro 1965.

[3] **R. Billinton,** Power System Reliability Evaluation (livro), Gordon and Breach Science Publishers Ltd, New-York, 1970.

[4] **B. E. Biggerstoff, T. M. Jackson,** «The Markov Process as a Means of Determining Generating Unit State Probabilities for use in the Spinning Reserve Application», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS -88, 1969, pp. 423-430.

[5] **R. Billinton** e **A. V. Jain,** «Unit Derating Levels in Spinning Reserve Studies», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS -90, 1971, pp. 1677-1687.

[6] **R. N. Allan, R. Billinton** e **M. Ferreira de Oliveira,** «Reliability Evaluation of the Auxiliary Electrical Systems of Power Stations», IEEE Winter Power Meeting, New-York, paper F 77 008-6 a publicar em Transactions of Power Apparatus and Systems em 1977.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração de todos os docentes do Gabinete de Produção, Transporte e Distribuição de Energia do Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e, em particular, a dos docentes, Eng.os Pereira da Silva e Borges Gouveia, integrados na linha de investigação «Análise, optimização e estudos de fiabilidade em sistemas eléctricos de energia» proposta ao I. N. I. C. para funcionar a partir de Janeiro de 1977.

NÚMERO 445/446 DEZEMBRO 1977/JANEIRO 1978 ANO LII/LIII VOLUME XXXIX

C. D. U. 621.39(469)

Concepção e projecto de sistemas de telecomunicações no País

MANUEL JOSÉ ABREU FARO (*)
PEDRO LUIS BORGES TEIXEIRA (*)

ÍNDICE

1 — Introdução
1.1 — Natureza e estrutura do relato
1.2 — Telecomunicações e electrónica
1.2.1 — Factos dominantes das telecomunicações
1.2.1.1 — Estabelecimento dos processos fundamentais
1.2.1.2 — As telecomunicações do nosso tempo
1.2.1.3 — A teoria da informação e a engenharia das comunicações
1.2.2 — Factos dominantes da electrónica
1.2.2.1 — Introdução
1.2.2.2 — Desenvolvimento da electrónica de vazio
1.2.2.3 — Desenvolvimento da electrónica do estado sólido
1.2.2.4 — Panorâmica actual — Alguns problemas e limitações fundamentais
2 — Síntese sobre a evolução e estado actual de alguns dos principais serviços de telecomunicações e meios de transmissão.
2.1 — Serviços de telecomunicações
2.1.1 — Rede pública de telecomunicações
2.1.1.1 — Aspectos fundamentais das redes de telecomunicações
2.1.1.2 — Tendências evolutivas das redes de telecomunicações
2.1.1.3 — Planeamento da rede nacional — Tipo especial de projecto de telecomunicações
2.1.1.4 — Rede pública de telecomunicações e perspectivas para a concepção e projecto de sistemas no país
2.1.1.5 — Alguns aspectos da comutação telefónica automática no contexto nacional
2.1.2 — Radiodifusão sonora
2.1.2.1 — Introdução
2.1.2.2 — Emissores
2.1.2.3 — Receptores
2.1.2.4 — Antenas
2.1.2.5 — Estúdios e STL
2.1.2.6 — Situação portuguesa. Perspectivas
2.1.2.7 — Participação nacional.
2.1.3 — Comunicações móveis em HF e VHF
2.1.3.1 — Comunicações em HF — Utilização, problemas e especificações
2.1.3.2 — Problemas principais das comunicações móveis em HF
2.1.3.3 — Evolução dos sistemas e tecnologia
2.1.3.4 — Realizações da indústria nacional. Potencialidades do seu mercado
2.1.3.5 — Comunicações em VHF/ /UHF
2.2 — Meios de transmissão
2.2.1 — Feixes hertzianos
2.2.2 — Interligação por cabo submarino e satélite
2.2.2.1 — Introdução
2.2.2.2 — Interligação por cabo submarino
2.2.2.3 — Interligação por satélite
3 — Apreciação das comunicações
3.1 — Reconhecimento de formas: Inteligibilidade da fala
3.2 — Equipamento telefónico: Comutação automática e sinalização
3.3 — Multiplexagem por divisão de frequência: Canal telefónico
3.4 — Transmissão de dados: Modems

(*) Engenheiro Electrotécnico, Professor do IST.

Relato do Tema 4 — Congresso da Ordem dos Engenheiros, Lisboa, Novembro 1977.

3.5 — Instrumentação e processamento digital
3.6 — Propagação na atmosfera: Feixes hertzianos
3.7 — Projecto e análise de circuitos electrónicos
3.8 — Amplificação de potência com transistores
3.9 — Informática
3.10 — Cooperação serviços-indústria
4 — Conclusões
5 — Temas para debate

1 — INTRODUÇÃO

1.1 — Natureza e estrutura do relato

Compreende este relato cinco capítulos através dos quais, e sucessivamente, se procede a uma descrição sumária do mesmo, a uma síntese sobre o estado actual da área considerada, à apreciação das comunicações e, finalmente, à apresentação de um dado conjunto de conclusões e à proposição de três temas para debate.

— O primeiro capítulo — Introdução — visa dois objectivos fundamentais:

— Esclarecer sobre a natureza e estrutura do relato e, também, sobre a orientação que se seguiu na sua feitura, nomeadamente em matéria de finalidades visadas.

— Apresentar uma panorâmica dos factos dominantes das Telecomunicações e da Electrónica que permita: uma visão contemporânea do desenvolvimento atingido, uma apreensão dos ritmos de desenvolvimento observados e, por último, um esboço das tendências evolutivas que se desenham.

— No segundo capítulo faz-se uma síntese sobre a evolução e estado actual de alguns dos principais serviços de telecomunicações e meios de transmissão, tanto quanto possível ligada ao contexto nacional e ao tema T4.

Sente-se que há lacunas, apresentou-se o que se conseguiu, procurar-se-á que as deficiências possam ser reparadas através dos debates que serão propostos e das intervenções que se esperam.

— No terceiro capítulo procede-se à apreciação e integração das comunicações apresentadas no contexto do tema T4 — Concepção e Projecto de Sistemas de Telecomunicações no País — o que consistiu, fundamentalmente, no seguinte:

— Apreensão e enunciado do conteúdo da comunicação, o que é diferente e não se confunde com o sumário apresentado pelos autores.

— Enquadramento desse conteúdo na área das Telecomunicações e Electrónica.

— Estabelecimento da correlação existente entre a comunicação e o Tema T4.

— O quarto capítulo — Conclusões — está fortemente ligado ao número e natureza de comunicações apresentadas.

São dois indicadores que permitiriam uma diagnose segura se, em relação às efectivas actividades da área das Telecomunicações e Electrónica no País, se tivesse observado um número significativo de comunicações, diversificado pelos sectores mais importantes ou promissores.

Não foi assim. É um facto.

As comunicações não foram numerosas — apenas 16 — e, em matéria de cobertura não se distribuiram uniformemente, pelo que há lacunas em relação a actividade que se sabe existir, como há lacunas em matéria de equacionamento de tendências e potencialidades.

Também não aflorou, o que teria sido importante, uma análise crítica, directamente correlacionada com os condicionantes das actividades de concepção e projecto de sistemas de telecomunicações no País.

Destes factos procurar-se-á tirar um conjunto de conclusões.

— Sendo assim, há a necessidade, como já se salientou, de uma acção complementar no tocante a intervenções.

No entanto, entregar uma acção dessas ao processo aleatório das intervenções parece imprudente pelo que serão propostos para debate alguns temas que permitirão cobrir os aspectos fundamentais do tema T4.

Com a fundamentação e enunciado desses temas se constitui o quinto capítulo e termina este relato.

* * *

A natureza e a estrutura do relato geral decorreram, em certa medida, do que em comum se acordou para qualquer dos temas deste Congresso.

Resta falar da feitura e orientação que se imprimiu ao relato, que são aspectos que já dependem do tema e, em última análise, da óptica dos relatores.

Como se chegou ao tema T4 é bem conhecido e apenas convirá salientar que resultou de um inquérito feito à classe que, da área das Telecomunicações e Electrónica, elegeu o referido tema:

Concepção e Projecto de Sistemas de Telecomunicações no País

Foi uma escolha clara, tantos foram os votos que convergiram para este tema.

Julga-se que houve alguma emotividade.

Legítima, no entanto, dada a incontroversa actualidade e importância do tema.

Tão incontroversa e acessível que não será errado pensar que muitos desses votos teriam vindo de pessoas que não são especialistas nem intervêm profissionalmente na matéria seleccionada.

Os especialistas foram, porventura, mais reticentes, conhecedores que são das dificuldades que há que vencer em matéria de Concepção e Projecto de Sistemas de Telecomunicações.

Terreno delicado e difícil se, em última análise, se tiver plena consciência, como têm os especialistas, do que essa actividade pressupõe em matéria de planificação e implementação e das actividades subjacentes que exige: estudo, desenvolvimento e investigação.

Talvez que isto justifique, por si só, o número reduzido das comunicações e os sectores que ficaram desertos.

* * *

Esta realidade que ressalta do número de comunicações, não podia deixar de se reflectir nos relatores.

Na realidade o tema é vastíssimo, pelo menos sob um ponto de vista potencial.

Por outro lado, as Telecomunicações interessam a todos, organizam-se em serviços, vão além dos serviços convencionais.

Como é bem conhecido, e adiante se salientará, as Telecomunicações dependem fortemente da Electrónica e esta não se confina às Telecomunicações.

Isto significa, em última análise, que existe uma área importante da Electrotecnia em que não é legítima uma dicotomia rigorosa e que deve ser tomada como um todo: Telecomunicações e Electrónica.

Sendo assim, considerou-se de interesse incluir na Introdução uma panorâmica sobre as Telecomunicações e Electrónica.

Considerou-se também indispensável o recurso a especialistas que, nessa qualidade, trataram os diversos serviços e meios de transmissão, tanto quanto possível, integrados no contexto nacional e no tema em causa.

Estas contribuições figuram no segundo capítulo.

A vastidão do tema assim exigia.

Atendendo à importância da Electrónica, considerou-se importante a existência de dois relatores cujos interesses, vocação e actividade se dirigissem, respectivamente, para as Telecomunicações e Electrónica.

No que respeita ao segundo capítulo não foi possível dispor de algumas das contribuições que se esperavam.

Isto verificou-se mais acentuadamente na Electrónica, mas também nas Telecomunicações, nomeadamente na sua natural extensão a sistemas não convencionais.

* * *

Finalmente, convém salientar que, num sentido restrito, o tema teve muito poucas comunicações.

Num sentido lato — contribuições sobre matéria cujo conhecimento condiciona futuras actividades de concepção e projecto — já não foi assim.

De qualquer modo e em conjunto, foram poucas as comunicações, apenas 16.

Sendo assim, os relatores optaram por um relato que fosse além dos aspectos particulares da concepção e projecto.

Aliás, e honestamente, não teria sido possível outra atitude.

Se tivesse sido possível uma perfeita delimitação do tema e ele pudesse ter sido tratado em profundidade, isso seria o sinal positivo de um estádio que ainda não logramos.

Em face desta realidade, os relatores não hesitaram em tomar uma atitude que visou fundamentalmente os seguintes objectivos:

— Fazer sentir a importância e extensão das Telecomunicações e Electrónica no momento actual;

— Mostrar quanto é rápido o ritmo de desenvolvimento destas disciplinas e das suas actividades;

— Evidenciar quanto esse desenvolvimento depende de um estádio de educação e de actividades de planificação, estudo, investigação e desenvolvimento;

— Mostrar, ainda que sinteticamente, o que são hoje e como evoluiram os grandes serviços de telecomunicações e, bem assim, os meios de transmissão intervenientes;

Relacionar, tanto quanto possível, esses serviços e meios com actividades efectivas ou potencialmente viáveis no contexto português;

— Evidenciar quanto é vasto e diverso o campo de actuação que as Telecomunicações e a Electrónica oferecem em matéria de concepção e projecto.

Em última análise, considera-se importante que se tome consciência do que se julga um facto incontroverso e que é o seguinte:

Em matéria de Telecomunicações e Electrónica não podemos optar.

No que poderemos optar será na acção efectiva e própria que nesse domínio a Engenharia Portuguesa possa desenvolver.

Aceitando assim, há que analisar profundamente os diversos factores que, em Portugal, condicionam e tem condicionado a concepção, projecto e fabrico na área das Telecomunicações e Electrónica.

* * *

Foram relatores:

Manuel José de Abreu Faro e Pedro Luís Borges Teixeira.

A elaboração das secções de especialidade ficaram a cargo de:

Abreu Faro, M. J. — Secção 1.2.1
Borges Teixeira, P. L. — Secções 1.2.2 — 2.1.3 — 2.2.2
Campos Neto, H. — Secção 2.1.2
Garcia Pereira, L. — 2.1.1.1 — 2.1.1.2 — 2.1.1.3 — 2.1.1.4 da Secção 2.1.1
Mota, J. L. — 2.1.1.5 da Secção 2.1.1
Salema, C. E. — Secção 2.2.1

* * *

Na Secção 2.2.2 — contou-se com a colaboração do Engenheiro José Carmona, da C. P. R. M.

Agradece-se ao Engenheiro António Valente a sua colaboração sobre Electromedicina — Tomografia Computerizada — a qual não se inclui no presente relato devido ao facto de não se ter conseguido outras contribuições que permitissem elaborar uma secção sobre: Alargamento das técnicas de transmissão

e tratamento de informação a sistemas não convencionais das telecomunicações. É matéria que poderá ser tratada em debate.

* * *

Agradece-se ao Dr. António Silva de Sousa a «Informação sobre a Cooperação no Domínio da Investigação Científica e Técnica promovida pelas Comunidades Europeias (Cost)».

Devido à delimitação do tema, o referido trabalho excedia, em generalidade, os objectivos visados.

No entanto, e uma vez que no tema T4 figuram determinadas comunicações que respeitam a actividade que se insere nessa forma de cooperação — COST — a referida informação será tomada em devida consideração no âmbito dos temas para debate.

1.2 — Telecomunicações e electrónica

1.2.1 — Factos dominantes das telecomunicações

1.2.1.1 — Estabelecimento dos processos fundamentais

Franqueado um determinado estádio de desenvolvimento, o estabelecimento de Comunicações constituiu sempre preocupação dominante de uma dada época.

Os meios utilizados dependem dessa época, mas a intenção é, em geral, mais antiga.

Mostra a experiência que os resultados expectáveis são sempre excedidos e que, em última análise, o tráfego aumenta em face dos meios facultados que logo se mostram insuficientes.

Sendo assim, o processo é objecto de uma natural atracção e interesse prático. Da intenção que lhe preside resultam imediatamente preocupações de eficiência, espaço e rapidez.

Por outro lado e à medida que se vai dominando nova fenomenologia, aumentam os meios potenciais de comunicação.

Isto é verdade para qualquer forma de comuni cação e, portanto, para as Telecomunicações, na acepção corrente do termo: estabelecimento de comunicações a distância utilizando como suporte significante grandezas físicas que se transmitem e propagam, sinais.

Destes factos e da descoberta do Electromagnetismo resultou para a Electrotecnia uma actividade extremamente importante devotada às Telecomunicações que se enriquece mais tarde com a descoberta da válvula electrónica.

Nasce, assim, uma nova disciplina, a Electrónica, que se constitui fonte primeira dos dispositivos com que se realizam as unidades activas que intervêm nos actuais sistemas de telecomunicações.

É evidente que as potencialidades de aplicação da Electrónica vão além das Telecomunicações. No entanto, e pela incontroversa importância destas últimas, Telecomunicações e Electrónica têm caminhado lado a lado, em permanente intermotivação:

São, de facto, fontes recíprocas de utilidade e inovação.

Por outro lado, verifica-se que há uma tendência geral para diminuição do intervalo que medeia entre a descoberta científica e a sua implementação tecnológica no campo da utilidade comum.

Em matéria das Telecomunicações asseguradas pela Electrotecnia, esse intervalo foi sempre relativamente curto.

Resulta daqui que qualquer que seja o tipo de intervenção que se deseje nos domínios das Telecomunicações e da Electrónica há necessidade de uma permanente actualização.

Acontece também que, em matéria de Telecomunicações qualquer sistema de porte significativo se insere quase sempre no contexto mais vasto de uma rede, onde deverá desempenhar uma acção concertada que deverá ir além da compatibilidade: de facto, não deverá destoar em modernidade de características e economia de meios.

Uma vez que os recursos facultados pela Electrotecnia são meios como outros quaisquer, é natural que exista uma essência associada às Telecomunicações que seja, em certa medida, independente do suporte físico dos sinais, quer no que respeita a conceitos, quer no que respeita às leis que condicionam esses conceitos e seus parâmetros.

De facto, dispõe-se, hoje, de uma teoria matemática da comunicação: a Teoria da Informação.

É uma teoria recente, dos meados deste século, que inicia uma nova fase das Comunicações: quer pela atitude que traduz, quer pelos resultados importantes que estabeleceu.

A partir daí, as Comunicações, como objectivo em si, adquiriram uma determinada autonomia disciplinar e passaram a regrar-se por conceitos próprios.

A Teoria da Informação precedeu-se de outras teorias importantes: Análise de Sinais e de Sistemas e Teoria da Modulação.

Em conjunto, estas teorias deram origem à moderna Engenharia de Sistemas de Comunicação.

Tem interesse salientar que a Teoria da Informação tem vindo a encontrar crescente aplicação.

Os sistemas que induz e preconiza são simples e eficientes e harmonizam-se, como seria de esperar, com as tendências da moderna Electrónica.

Sem querer fazer história, mas tão somente ilustrar o que tem sido até hoje o desenvolvimento observado, passaremos em revista os factos dominantes das Telecomunicações.

* * *

A utilização da Electrotecnia pelas Telecomunicações afirma-se a partir dos anos 30 do século XIX.

Até 1900 apenas intervieram circuitos, linhas e radiadores e os geradores de alta frequência limitavam-se a produzir trens de ondas amortecidos.

Em 1904 a Electrónica entra em cena: Fleming, descobre e domina a válvula electrónica, o díodo.

Em 1907, Forest, introduz um terceiro eléctrodo: estava descoberto o tríodo e, bem assim, algumas das suas potencialidades básicas.

É no período que se segue à Primeira Guerra Mundial que se observa um desenvolvimento espectacular e isso fica-se devendo à Electrónica.

Em 1924, Marconi, domina a fenomenologia básica e a tecnologia subjacente às comunicações em «ondas curtas», que passaram a ser universalmente utilizadas e sistematizadas.

Assim, é necessário quase um século, para que as Telecomunicações suportadas na Electrotecnia adquiram consciência dos processos fundamentais e criem o seu espaço próprio no que respeita ao processamento e encaminhamento dos sinais.

Fazem parte integrante desse espaço os circuitos passivos e activos que se foram concebendo e que, na sua essência, realizavam todas as operações fundamentais da Moderna Electrotecnia das Telecomunicações.

Evidentemente que coube à Electrónica a parte verdadeiramente inovadora mas convém dar a devida importância ao início do estudo sistemático dos órgãos passivos.

* * *

Durante este período a actividade concentrou-se na pesquisa de novos processos de comunicação.

Nessa actividade observa-se uma correlação directa entre as aquisições da Ciência e o desenvolvimento conseguido.

De facto, em 1831, Faraday descobre e anuncia a «lei da indução».

Em 1832, Morse, de visita à Europa, impressionado com a rapidez de actuação de um electroiman, motiva-se para a concepção de um telégrafo que seguia já, em matéria de codificação, as boas regras da Teoria da Informação.

Em 1840 já a Europa se ia enriquecendo com uma rede telegráfica.

Em 1866, após vários acidentes técnicos, a Europa e América ligavam-se através de um cabo submarino.

Em 1873, Lord Kelvin, debruça-se sobre os problemas postos pelo cabo submarino e introduz uma inovação: utiliza impulsos dipolares de igual duração e em correspondência com o «ponto» e o «traço» do código Morse. Assim se melhorou a resolução e a velocidade de transmissão.

Em 1876 surge o telefone de Bell.

Neste contexto, em 1888, Hughes inventou o microfone de grenalha de carvão, o que é de facto uma inovação profunda: estabelece-se, sem completa consciência da universalidade do processo, o princípio da amplificação de sinais a partir de circuitos energeticamente independentes e comandados analogicamente pelo sinal.

Importantes, também, são os trabalhos de Heaviside, 1893, e a sugestão que resulta dos seus trabalhos teóricos: diminuição da atenuação a partir do aumento da auto-indução natural das linhas.

Nesta base, Pupin desenvolveu uma teoria de parâmetros concentrados que conduzia à «carga» das linhas de transmissão, 1900.

Também Krarup apresentou uma solução, menos seguida, mas que tinha a virtude de manter a uniformidade das linhas: «carga contínua». Foi aplicada com êxito nos cabos submarinos, permitindo um aumento de velocidade de transmissão da ordem de 4 a 5 vezes.

Não existindo amplificadores electrónicos, procurava-se reduzir a atenuação dos meios passivos.

A pupinização tinha um preço: reduzia a atenuação mas diminuia a banda de frequências do sistema, o que para a fonia não era muito agradável.

A pupinização das linhas aéreas não se mostrou vantajosa e acabou por ser abandonada.

Nos cabos telefónicos, pelo contrário, era onde era mais necessária e viável.

Os cabos telefónicos surgiram pelas vantagens que exibem em relação às linhas aéreas:

— menos sujeitos a agentes externos

— melhores condições no que respeita a diafonia: cabos equilibrados

— menos sujeitos a avarias

— facilidade de concentrar num único cabo um número significativo de pares telefónicos.

A traços largos, e em matéria de comunicações guiados por condutores, estes foram os avanços até 1900 e nesta situação se entrou no século XX.

* * *

Além deste espaço outro se construiu: o das ligações hertzianas.

A lei da indução de Faraday conduziu ao Electromagnetismo, mas a teoria ainda não estava completa.

Essa teoria completou-a Maxwell, em 1864, publicando as equações fundamentais do Campo Electromagnético: as equações de Maxwell.

Em 1887, Hertz gera no laboratório as ondas electromagnéticas previstas na Teoria de Maxwell. Além da teoria de um dipolo radiador e sistema detector (ressoador), Hertz realizou uma série notável de experiências de onde resultou uma completa evidenciação e clarificação da existência das ondas electromagnéticas e do seu comportamento: radiação, reflexão e refracção.

Em 1894, Marconi, tendo tomado conhecimento dessas experiências, inicia trabalho experimental com um objectivo concreto:

Utilizar as ondas hertzianas nas comunicações.

As primeiras experiências conclusivas em matéria de radiotransmissão de sinais telegráficos datam de 1897: experiências de Lavernock.

Entretanto, Marconi foca a sua atenção nas potencialidades da sintonia já evidenciada, em 1889, por Lodge.

No princípio deste século, Dezembro de 1901, Marconi consegue estabelecer a ligação da Europa

à América, via rádio. É coberta uma distância de 3500 Km.

As experiências de Hertz induziram, uns tantos, a que tal ligação era fisicamente inexplicável: falava-se de uma montanha de mar que teria que ser trespassada pelas ondas electromagnéticas.

Na confirmação das suas experiências, Janeiro de 1902, a bordo do «Philadelphia» e afastando-se de Inglaterra, Marconi recebe nitidamente, durante o dia, sinais emitidos a uma distância de 1100 Km.

De noite, o alcance verificou-se ser maior: 2500 Km.

Foi descoberto o que então se designou por «efeito da noite».

Em 1902, Heaviside e Kennely postularam a existência de uma «camada condutora» onde as ondas electromagnéticas se reflectiriam.

Só em 1924 e 1925, Appleton e Barnett concebem, levam a efeito e interpretam experiências que esclarecem definitivamente sobre a existência e natureza da «camada condutora», tratava-se da ionosfera. Na linguagem de hoje, de um plasma, e porque está imerso no campo magnético da terra: um magnetoplasma.

Entretanto, guiado pelo seu objectivo, Marconi continuava a trabalhar e, em 1905, introduz mais um avanço importante: a antena direccional.

Por outro lado, como Marconi reconhece em 1922, o êxito e progressos conseguidos com as ondas longas (e médias) foi tão grande que distraiu a atenção das ondas curtas, agora facilmente acessíveis com a Electrónica.

Esta meditação leva-o a retomar de modo sistemático, a bordo do «Elettra», transformado num laboratório, o estudo do comportamento das ondas curtas em matéria de comunicações.

Sem grande teoria, por intuição e pesquisa experimental intensa, Marconi conclui pela viabilidade da ligação de dois pontos quaisquer da Terra, a qualquer hora do dia, e desde que se procedesse a uma escolha criteriosa da frequência de trabalho.

Para o seu intento final conta com Franklin, quer no que respeita a emissores, quer no que respeita a antenas.

Estes trabalhos culminam com o êxito da ligação telefónica Inglaterra-Austrália, [Poldhu-Sidney], estava-se em Maio de 1924 e estava aberto o caminho ao «short-wave beam system» que, dentro em breve, foi universalmente adoptado.

Estes os avanços conduzidos por Marconi, em matéria de radiotelegrafia e radiotelefonia, tendo em vista o estabelecimento de sistemas de telecomunicações de longo alcance, utilizando as ondas hertzianas.

Tinha-se caminhado desde a experiência transatlântica de 1901, utilizando ondas de 350 m, uma estação de alta potência, descargas oscilantes amortecidas através de faiscadores, e antenas omnidireccionais, em azimute, até a um sistema directivo de onda-curta, suportando de modo principal em aparelhagem electrónica.

Tem interesse referir que na concepção e realização das estações de alta potência, utilizadas na experiência de 1901, Marconi contou com a colaboração de Fleming, então especialista em alta-tensão. Três anos mais tarde Fleming descobriria o diodo.

* * *

No que respeita à teoria dos circuitos há que referir entre os anos de 1910 e 1930, os trabalhos básicos de G. A. Campbell, K. W. Wagner, O. J. Zobel, J. R. Carson e W. Cauer.

Foram contribuições básicas que levaram a conceitos extremamente úteis e constituiram a base da moderna teoria dos quadripolos, da sua análise e mais tarde da sua síntese.

Em matéria de geradores de alta frequência evoluiu-se dos geradores de oscilações amortecidas para os geradores de arco que já garantiam a auto-oscilação, Poulsen e outros.

Apareceram os alternadores: Goldschmidt, Alexanderson-Fessenden, Schmidt e Latour.

Finalmente surgem os osciladores utilizando tubos electrónicos e nesta matéria avultam, de entre outros, os trabalhos de Meissner, Franklin, Barkhausen, Möller, Colpitts, Hartley, Chafee.

Além desta contribuição importantíssima, os tubos electrónicos passam a ser utilizados nas mais diversas funções.

* * *

Ao longo de 100 anos as Telecomunicações, em matéria de processos e de meios essenciais disponíveis, atingiram um grau elevado de maturidade, propício à reflexão e à pesquisa sistemática.

Até então, o seu espaço próprio e o seu universo tinham-se enriquecido fundamentalmente a partir da integração da fenomenologia da ciência contemporânea.

Ainda não se tinha entrado verdadeiramente numa fase analítica e muito menos numa fase sintética.

As telecomunicações estavam fortemente confundidas com os processos tecnológicos.

É na parte final desse período, após a Primeira Guerra Mundial, que se começa a tomar consciência das propriedades do sinal e da sua dimensionalidade no espaço tempo-frequência.

Entre outros podem considerar-se fundamentais os trabalhos e resultados de E. H. Colpitts e O. B. Blackwell (1921), J. R. Carson (1922), R. V. Hartley (1923), H. Nyquist (1928).

Nesse contexto já se fala claramente da Teoria da Modulação e decorrentemente de portadora e de bandas laterais.

Nyquist, 1924 e 1928, e Hartley, 1928, já abordam, numa atitude moderna, o problema da velocidade de transmissão.

Harley já utiliza o conceito, ainda não definido, de quantidade de informação, o que representa um

primeiro passo no sentido dos modernos conceitos de ritmo de informação e capacidade de um canal.

Assim, e sem prejuízo de intuições, mais remotas e desgarradas, de alguns precursores do passado, onde avulta Lord Kelvin, é durante a década 20-30 que os sinais utilizados em telecomunicações começam a abstrair-se dos processos físicos em que se suportam.

Os sinais ganham dimensionalidade e, decorrentemente, os sistemas físicos associados às diversas vias de comunicação adquirem também dimensionalidade:

— Na frequência: largura de banda disponível.

— No tempo, relativamente à resolução que permitem.

Conceitos que não são independentes e estão formalmente ligados pela análise de Fourier e sua aplicação à análise de sinais e sistemas de transmissão.

* * *

Desta consciência resultou a preocupação da exploração das potencialidades, em largura de banda, de linhas, cabos e ligações hertzianas, muito particularmente dos primeiros.

Nasce, assim, em toda a sua importância e variedades que reveste, a multiplexagem por divisão de frequência: FDM.

A multiplexagem por divisão no tempo, TDM, foi sugerida no século XIX mas não se desenvolveu devido a condicionamentos instrumentais.

Como se verá, o TDM marca a época actual e as suas tendências para o futuro.

Entretanto, tinha-se tomado consciência de uma outra forma de «multiplexagem» que é aquela que ocorre nos cabos multipares.

Em conjunto, e por este processo, pode dispor-se de estruturas que são múltiplas no duplo aspecto de: multiplicidade de pares associados a uma única estrutura material e FDM em cada um deles.

Durante a Primeira Guerra Mundial já se exploravam linhas aéreas em FDM com um número reduzido de canais.

Entretanto, com a Electrónica, tinham aparecido os repetidores: as cargas aligeiraram-se e o espectro alargou-se.

Pelos anos 30 decorriam experiências de sistemas FDM em cabos subterrâneos multipares, não carregados.

Houve que enfrentar problemas graves de diafonia.

Dominada a técnica dos cabos multipares, anos de 34, começam a reconhecer-se as vantagens do recurso a pares do tipo coaxial.

Os primeiros sistemas, utilizando cabos coaxiais, foram instalados nos Estados Unidos em 1937 e na Inglaterra e Alemanha em 1938.

* * *

Sem a pretensão de sermos exaustivos, procuramos dar a traços largos um relato do que foi o desenvolvimento das Telecomunicações ao longo de 100 anos.

Durante esse período dominaram-se as comunicações guiadas por linhas e cabos e estabeleceu-se uma rede de radiocomunicações que permitia a ligação de quaisquer dois pontos à superfície da Terra.

A ionosfera e, em conjugação, a superfície da Terra constituiram-se camadas «reflectoras» que se utilizavam como «repetidores» passivos.

O método de transmissão em banda lateral única, estabelecido por Carson em 1925, iria permitir tirar vantagens e permitir um FDM incipiente nas ligações hertzianas, mas as frequências eram ainda baixas e as bandas disponíveis estreitas.

Davam-se os primeiros passos no sentido das microondas, nomeadamente, através das experiências de Marconi, de 1933. No entanto, ainda se estava longe dos feixes hertzianos.

A Electrónica implementara-se de modo definitivo nas redes de Telecomunicações.

O cabo submarino haveria de ser retomado. Novas ligações hertzianas iriam nascer.

1.2.1.2 — As telecomunicações do nosso tempo

Apenas serão focados os dois seguintes aspectos fundamentais:

Serviços e meios de transmissão.

São na realidade aqueles que definem, de modo principal, uma rede de telecomunicações no que respeita, respectivamente, a objectivos e opções de que dispomos para economicamente atingir esses objectivos.

Em matéria de meios de transmissão, os tempos modernos têm sido caracterizados pelo aumento da largura de banda facultada pelos diversos meios utilizados. Nomeadamente, o cabo coaxial e as ligações hertzianas altamente dirigidas (feixes).

O recurso a meios de banda larga é um corolário do aumento de tráfego nas comunicações ponto a ponto e do desenvolvimento dos serviços de radiodifusão, muito principalmente da televisão.

Por outro lado, tudo leva a crer que os factores económicos encoragem a desenvolver meios de banda larga e, simultaneamente, amplificadores de banda larga e de baixo factor de ruído.

De facto, o preço da «largura de banda» é proporcional à raiz cúbica da dimensão efectivamente utilizável.

Resulta daqui que o preço de um canal é proporcional ao inverso da potência 2/3 do número de canais que a via acomoda.

Isto significa que se considerarmos a banda de base de 60 a 108 KHz e notarmos que em 108 KHz se acomodariam 27 canais de 4 KHz, o preço isolado desse sistema é cerca de 20 vezes mais caro do que o sistema de 12 vias derivado de um cabo coaxial de 12 MHz.

Este indicador é citado por Halliwell — Advanced Communication Systems, 1974.

Desde que não ocorram anomalias ou singularidades de natureza económica, existe uma determinada segurança de que esta lei continuará a ser válida num dado futuro.

Completamente rigorosa ou não, esta lei levanta, de modo claro, a importância económica dos meios de banda larga.

No presente, estão em plena exploração os seguintes meios de banda larga:

Cabos coaxiais e feixes hertzianos.

Nos cabos coaxiais inclui-se o cabo submarino.

Nos feixes hertzianos, e como técnica, inclui-se o satélite.

Em via de desenvolvimento há que referir:

Guias de ondas circulares-modo TE_{01}, fibras ópticas e laser.

* * *

O desenvolvimento observado nas telecomunicações é um facto que todos aceitarão. No entanto, e a traços largos, convém proceder à análise geral da sua evolução nos últimos 50 anos, que é quanto nos separa do limiar dos anos 30.

Nessa época a radiodifusão já alcançara um desenvolvimento importante.

O período que decorreu entre 1907 e 1914 foi um período experimental. Durante a Guerra observaram-se progressos mas, na realidade, é só nos fins de 1920 que se inicia um serviço público de radiodifusão nos Estados Unidos e, em 1921, na Europa — França e Inglaterra.

O receptor utilizando tubos electrónicos aparece em 1923. Até lá, e mesmo nos anos que se seguiram, o receptor de galena continuou a ter acção fundamental.

Em 1924 é inventado o superheterodino.

Em 1930 o receptor de radiodifusão tinha adquirido a sua estrutura actual.

Aparecem as antenas de quadro.

Em 1940 a sensibilidade atingida simplificou muito as coisas e relegou o problema das antenas de recepção para um segundo plano.

Em 1950 aparecem as antenas de ferrite: ondas longas e médias.

Em 1955 os receptores transistorizados são comercializados e a Electrónica do Estado Sólido torna-se o sucedâneo natural dos tubos electrónicos.

Em 1938 iniciam-se nos Estados Unidos a radiodifusão em modulação de frequência que se tornou, mais tarde, o suporte apropriado para programas de alta fidelidade monoaural e seguidamente estereofónica.

Como serviço público, a televisão começou em 1929 através da BBC, em Inglaterra: 30 linhas.

Em 1933 surge o primeiro sistema de elevada definição: 240 linhas e 25 imagens por segundo.

Em 1937, com o advento do iconoscópio, adoptam-se sistemas de melhor definição de imagem:

405 linhas no Reino Unido, 441 nos Estados Unidos; a França fixa-se em 1948 em 819 linhas, a maior parte dos países da Europa adoptam o sistema de 625 linhas.

Em 1960, e tendo em consideração a perspectiva da televisão a cores, a França e a Inglaterra adoptam o sistema das 625 linhas para os novos programas.

Em 1953 adopta-se, nos Estados Unidos, o sistema de televisão a cores NTSC.

Na Europa conduzem-se diversos estudos que culminam, em 1966, pela rejeição do sistema NTSC adaptado às 625 linhas e adopção de qualquer dos dois sistemas: SECAM, de origem francesa, PAL, de origem alemã.

Estes os principais acontecimentos em matéria de radiodifusão do som e da imagem.

Outros serviços de difusão se imaginaram e entrevêem, nomeadamente utilizando condutores, mas estes que referimos foram aqueles que marcaram de modo decisivo a nossa época: de tal modo têm vindo a contribuir para as relações da sociedade entre si e com o mundo natural e de conhecimentos em que vive.

* * *

No que respeita às comunicações ponto a ponto, observava-se nos anos 30 a seguinte situação:

— Domínio razoável das comunicações em cabos multipares utilizando frequências portadoras.

— Início dos estudos tendentes ao estabelecimento de sistemas de banda larga, utilizando cabos coaxiais (1934).

— Primeiros progressos na utilização dos cabos submarinos em fonia, utilizando repetidores não submersos (1920-1940).

Em 1943 procederam-se a experiências importantes utilizando um repetidor submerso o que desencadeou o movimento que haveria de tornar o cabo submarino uma via de comunicação de banda larga importante e competitiva no âmbito das comunicações a grande distância.

Nos anos 30, as comunicações a grande distância, eram asseguradas quase que exclusivamente por ligações hertzianas que cobriam o espectro dos 30 KHz aos 30 MHz: ondas kilométricas, hectométricas e decamétricas.

* * *

O aumento de tráfego nos serviços de comunicações ponto a ponto e a intervenção na radiodifusão de sistemas de banda larga — FM e TV — determinaram a evolução que se tem observado e observa do recurso a portadoras cada vez mais elevadas em matéria de ligações hertzianas e, bem assim, tendo em consideração, a saturação do espectro, ao desenvolvimento de sistemas de propagação guiada de banda larga.

Por razões que a seguir se exporão, tem-se mantido interesse nas frequências muito baixas: 10 a 30 KHz.

O espectro de 1930 alarga-se de 30 KHz—30 MHz para 10 KHz — 300 GHz, este limite superior é um

indicador em relação a experiências em curso. Isto em matéria de ligações hertzianas e não considerando o espectro óptico.

* * *

Entretanto, o cabo coaxial foi objecto de uma revisão profunda.

De facto, as ligações hertzianas altamente dirigidas e em linha de vista, tinham arrancado em 1933, na Inglaterra: 1724 MHz, cobrindo um vão de 56 Km. Tratava-se das microondas.

As microondas desenvolveram-se extraordinariamente durante a Segunda Guerra Mundial, tendo em vista a produção de equipamento destinado a fins militares, nomeadamente e de modo principal, o Radar em relação ao qual se procurava crescente fiabilidade e aumento de resolução.

Depois da guerra, o desenvolvimento prosseguiu e a importância das ligações, em linha de vista, ganhou crescente interesse, quer no que respeita às comunicações ponto a ponto, quer como meio de banda larga utilizado na interligação de estações de radiodifusão: não se tratava só da TV, mas este serviço foi factor primordial de desenvolvimento, como aliás já tinha sido para os cabos de banda larga.

Nasciam, assim, os «feixes hertzianos».

A partir de 1950 afirmou-se o desenvolvimento dos feixes hertzianos e começou a estabelecer-se uma rede continental de feixes que entrou em franca competição com os cabos coaxiais.

Em 1945, A. C. Clarke, propunha uma extensão dos sistemas de repetidores terrestres: aquela que utilizaria localizações extra terrestres. Nomeadamente, Clarke, salientava que se obteria uma órbita geostacionária se um satélite fosse colocado no plano equatorial a 35 880 km de altitude e com um período de revolução de 24 h. Três destes satélites promoveriam a cobertura de toda a superfície terrestre com excepção das calotes polares.

Conceptualmente, trata-se de um documento importante e que teve que aguardar a sua oportunidade.

Em Outubro de 1957 é lançado o primeiro satélite artificial: o Sputnik.

Em 1960 iniciam-se experiências com um satélite passivo, Echo I, que foi utilizado como simples reflector passivo.

Em Julho de 1962 foi lançado o Telstar que foi o primeiro satélite activo a dispor de um repetidor de banda larga.

Em Fevereiro de 1963 foi lançado o primeiro satélite de órbita geostacionária, Syncom, mas a experiência falhou.

Em Julho de 1963 é lançado o segundo Syncom e colocado na órbita prevista. As comunicações processaram-se normalmente. A previsão de 1945 ganhava realidade.

— O ponto de retorno colocava-se muito além da camada F da ionosfera.

— A ionosfera, que era um alvo passivo e com perdas, dá lugar a centros de repetição activos, estacionários, sem os inconvenientes da «meteorologia» da ionosfera.

Com estes sucessos, as comunicações a grande distância passaram a dispôr dos seguintes meios de comunicação de banda larga:

— Cabos coaxiais e feixes hertzianos.

— Cabo submarino e satélite.

Os meios considerados em cada um dos grupos são semelhantes em objectivos e, portanto, competitivos no momento actual.

Durante os primeiros 20 anos após a II Guerra Mundial, a primazia coube aos feixes hertzianos.

Ultimamente, tem havido um retorno ao cabo coaxial, sem que isso signifique menor progresso em matéria de feixes.

No entanto, os dois sistemas são susceptíveis de comparação e, por isso mesmo, competitivos.

Uma das vantagens do cabo coaxial reside no problema de acumulação de ruído quando confrontado com os feixes hertzianos: a banda de base pode ser utilizada directamente no cabo sem necessidade de operações de modulação.

No que respeita ao cabo submarino e satélite, existe hoje uma certa identidade de objectivos, fundamentalmente no que respeita à repartição de tráfego.

Potencialmente, o satélite é mais promissor; basta considerar os graus de liberdade que exibe em relação ao cabo submarino, nomeadamente no que se refere a sistemas regionais e domésticos, envolvendo, respectivamente, um dado conjunto de países ou um só.

* * *

Ocorre, neste momento, perguntar se as radiocomunicações tradicionais se tornaram obsoletas? Na realidade, não.

No que respeita a comunicações ponto a ponto e a grande distância, as ondas decamétricas cederam parte importante do tráfego a favor do cabo submarino e do satélite, mas continuam a ser usadas, sempre que o tráfego seja diminuto.

Por outro lado, os progressos nas técnicas de banda lateral única e o emprego de modulação de frequência — FSK — conjuntamente com sistema detector e corrector de erros em grafia e transmissão de dados, são factores importantes para que as ondas decamétricas continuem a ter acção significativa em serviços fixos.

Não obstante as possibilidades que os satélites oferecem em relação às comunicações móveis, as ondas decamétricas continuam a ser utilizadas nos serviços marítimos e serviços aeronáuticos.

No que respeita à radiodifusão em ondas kilométricas e hectométricas assiste-se a uma crescente saturação do espectro que tem a sua origem nos seguintes factos:

— Aumento do número de estações regionais e da sua potência.

— Congestionamento, agravado durante a noite pelo desaparecimento da absorção pela ionosfera.

— Ruído originado em instalações industriais.

Isto põe problemas e é objecto de preocupação em matéria de radiodifusão em ondas hectométricas.

Pelo contrário, a radiodifusão em ondas decamétricas continua a ter interesse e deverá desenvolver-se. Continua a ser o meio mais económico de servir regiões distantes e pouco populosas.

Na baixa frequência, desenvolveram-se e continuam a ter interesse as ondas miriamétricas: 10 a 30 KHz.

São as que possibilitam a comunicação com submarinos submersos.

O comportamento da ionosfera nestas frequências, reflexão quase perfeita, permite obter maior precisão, na transmissão de sinais horários e frequências padrão, do que aquela que se obtém usando ondas decamétricas.

Analisadas as ondas miriamétricas, kilométricas, hectométricas e decamétricas, resta-nos falar das ondas métricas.

As ondas métricas são bastante usadas em pequenas distâncias — serviços fixos e móveis — e sempre que o tráfego seja fraco.

Devido à sucessiva saturação do espectro houve que passar das bandas na vizinhança dos 40 MHz para 80, 160 e 400 MHz.

As ondas métricas são também largamente usadas nos serviços regionais de MF e TV.

* * *

Antes de retomarmos a questão dos meios de banda larga no que respeita às suas perspectivas futuras, há que falar das ligações transhorizonte ou feixes troposféricos.

Apareceram antes dos feixes hertzianos e completam, em certa medida, as potencialidades dos primeiros.

Quando se estuda a propagação das ondas electromagnéticas emergentes de uma antena e tendo em consideração a presença da superfície terrestre, sabe-se que além do horizonte hertziano a intensidade do campo cai rapidamente. Esse campo apenas se explicava por difracção esférica. Mais recentemente, pelos anos 50, experiências realizadas com ondas decimétricas, permitiram evidenciar a existência de um campo bastante mais intenso que o campo de difracção e que, portanto, não se explicava por esse mecanismo.

Hoje distinguem-se e dominam-se as três seguintes zonas, sucessivamente mais afastadas da antena emissora:

— Zona de visibilidade directa

— Zona de difracção esférica.

— Zona iluminada por dispersão troposférica.

Em 1950 iniciaram-se, nos Estados Unidos, estudos sistemáticos que se constituiram no primeiro passo para trabalhos teóricos e experimentais que levaram ao estabelecimento e domínio de mais uma importante via de comunicação.

Em UHF conseguem-se alcances da ordem das 400 milhas (640 Km) e milhares de quilómetros poderão ser cobertos se utilizarmos várias estações em tandem.

Por este processo têm sido operados sistemas múltiplos de fonia, 12 a 240 canais e transmitidos programas de televisão.

Existe um feixe troposférico entre o norte de Portugal (Nogueira — Bragança) e a França (Mont Artzamendi — Bayonne).

Existem feixes troposféricos nas bandas de 160 MHz e 450 MHz, sobretudo em regiões de fraca densidade de população e de fraco tráfego.

As bandas mais utilizadas são, no entanto: 860 — 980 MHz; 2,45-2,7 GHz e 4,4-5,0 GHz.

As possibilidades abertas pelos satélites não aconselharão a incorporação dos feixes troposféricos nas vias destinadas a ligar pontos a grande distância, no entanto, apresentam interesse em serviços regionais ou domésticos.

* * *

Terminamos este capítulo com uma breve referência aos meios de transmissão de banda larga que são, neste momento, objecto de investigação e desenvolvimento.

Em matéria de feixes hertzianos existe natural interesse nas ondas milimétricas 30-300 GHz e até nas frequências mais elevadas.

Com independência dos problemas e soluções que se pesquisam ou já se encontraram em matéria de osciladores, amplificadores e outro equipamento interveniente nas estações emissoras, receptoras e repetidores, há que salientar o problema da absorção e dispersão na atmosfera.

De facto, é bem conhecido que a partir dos 10 GHz (3 cm) se começam a observar absorções significativas por parte dos constituintes da atmosfera: oxigénio, vapor de água, chuva, etc.

Sendo assim, existe uma actividade importante de investigação teórica e experimental nesta matéria, nomeadamente no domínio das ondas centimétricas.

As adopções não dependem, no entanto, e só deste aspecto, mas de um outro que é importante: conhecimento meteorológico que permita determinar a distância sobre a qual é provável chuva intensa e simultânea.

Deste conhecimento dependerá o estabelecimento da distância entre repetidores e, em última análise, o interesse económico do sistema.

De qualquer modo, as ondas milimétricas constituem um meio promissor em matéria de feixes hertzianos e também nas comunicações espaciais, incluindo as ligações via satélite.

* * *

Os problemas postos pelos feixes hertzianos — interferência resultante de caminhos múltiplos, turbulência e absorção na atmosfera — poderão ser evitados recorrendo à propagação guiada.

Para grandes distâncias e no domínio das microondas as atenuações introduzidas pelo cabo coaxial

são muito elevadas, pelo que se recomenda o recurso a guias de onda.

O guia de secção rectangular ainda apresenta atenuações que não encorajam à sua utilização em transmissões a grande distância.

Já assim não sucede com o guia de secção circular quando operado no modo TE_{01}.

Desde que se trabalhe em frequências que excedam largamente a frequência de corte, a atenuação pode descer até 1 dB/km e os efeitos da dispersão são reduzidos.

Isto obriga a utilizar relações, diâmetro/comprimento de onda, da ordem de 7. Para que o guia não exceda dimensões razoáveis: diâmetros da ordem dos 5 cm. Ter-se-á, em conformidade, de trabalhar além dos 30 GHz (1 cm).

Nas condições enunciadas, muitos outros modos são possíveis além do modo TE_{01}.

Resulta daqui um problema que é o da conversão deste modo noutros e destes últimos em modos TE_{01}.

Isto tem dois efeitos: introdução de uma atenuação suplementar e distorção.

Diversas soluções têm sido adoptadas para evitar este efeito que resulta da existência de descontinuidades funcionalmente necessárias ao longo da estrutura uniforme do guia.

Neste momento existem diversos sistemas experimentais operando na banda 30-100 GHz. Por divisão de frequência são explorados diversos canais de ida e de volta com uma largura de banda de 0,5 GHz e uma capacidade de 500 Mb/s.

Embora se venha a reduzir a distorção devida à conversão de modos, a dispersão deste meio não o dirige para a transmissão analógica mas sim para a transmissão digital.

O sistema referido trabalha em transmissão digital por modulação de fase, as estações repetidoras exibem um espaçamento de 20 km e dispõem de igualizadores para corrigir os efeitos da dispersão e, ainda, de regeneradores a fim de evitar efeitos cumulativos de distorção dos impulsos.

* * *

O aparecimento do laser em 1960 teve uma acção decisiva nos meios ópticos de comunicação. Isto, não obstante e desde há muito se ter associado às comunicações ópticas uma parte importante das suas potencialidades.

As suas completas potencialidades só poderão ser entrevistas a partir de um determinado estádio de desenvolvimento experimental e efectivo domínio de alguns meios ópticos.

No entanto, não subsistem dúvidas de que os meios ópticos são potencialmente capazes de veicular portadoras de banda muito larga e permitir uma multiplexagem sobre um espectro extensíssimo.

Com o recurso às técnicas da óptica, nomeadamente aquelas que garantem e corrigem a colimação do feixe, o primeiro meio que ocorre é a de um «feixe óptico», extensão natural do «feixe hertziano»: comunicações ponto a ponto, mas agora no espectro óptico.

Trata-se, evidentemente, de um meio atraente principalmente no que respeita à posição relativa dos pontos que permite ligar: ligações espaciais, ligações na Terra, com regiões submersas, etc.

Estas potencialidades estão condicionadas pelas técnicas ópticas disponíveis, pela interacção radiação-matéria e, portanto, pelos lasers de que dispomos e riscas em que radiam.

Nas comunicações ponto a ponto, processadas na atmosfera, enfrentam-se exactamente os mesmos problemas que nos feixes hertzianos:

Heterogeneidades da atmosfera e sua variação no espaço e no tempo, absorção e meteorologia dos percursos.

Sem prejuízo dos desenvolvimentos que se observem, estes problemas podem ser evitados se recorrermos à propagação guiada.

Em princípio, poder-se-ia recorrer aos guias de onda utilizados em ondas centimétricas, milimétricas e submilimétricas, mas o comprimento de onda é de tal modo pequeno em relação à nossa escala de fabrico que se tornaria difícil construir guias dessa natureza operados no espectro óptico e trabalhando num só modo.

Acresce que as perdas nos metais são, no espectro óptico, muito elevadas, problema que aliás já se enfrenta nas ondas milimétricas.

Uma alternativa promissora é a dos guias dieléctricos e destes vêm ganhando crescente interesse as fibras ópticas.

Neste domínio, encontram-se em investigação e desenvolvimento os seguintes meios:

— Fibras operadas num só modo: são extremamente delicadas pois envolvem um núcleo de diâmetro da ordem de 3 μm revestido por uma camada de 20 μm de espessura: é um exemplo concreto.

Este meio oferece uma banda muito larga: teoricamente de 10 GHz.

Já se dispõe de materiais que conduzem a uma atenuação inferior a 20 dB/Km.

— Fibras operadas em diversos modos: o núcleo destas fibras é muito mais espesso, diâmetro de 60 μm, recoberto por uma camada de 3 μm: trata-se de outro caso concreto.

Sendo assim, não põe problemas tão graves de injecção óptica e ligação dos extremos das fibras.

No entanto, a operação multi-modal acarreta, como é evidente, redução da largura de banda.

Numa primeira análise teórica, admitindo que todos os modos possíveis estavam presentes e repartiam entre si, e de modo uniforme, a energia posta em jogo, a largura de banda desta fibra seria apenas da ordem de alguns MHz.

No entanto, outros mecanismos entram em jogo pelo que a largura de banda é melhor: algumas centenas de MHz sobre uma distância de 1 km.

Já se conseguiram fibras com atenuação da ordem de 4 dB/km.

Pensa-se que será possível aproximar o limite imposto pela difusão da luz, e que é 1 dB/km.

Há dez anos tinha-se imposto uma atenuação inferior a 20 dB/km como factor de viabilidade das fibras ópticas.

Neste momento a situação é a seguinte:

Para qualquer dos dois tipos de configuração — modo simples ou multi-modal — admite-se que a largura de banda de 1 GHz é um alvo atingível.

Também faz sentido admitir que, dentro em breve, se disporão facilmente de fibras ópticas com atenuação da ordem de 5 dB/km.

Por outro lado tomou-se consciência que os modelos teóricos, não tomando em consideração todas as circunstâncias e mecanismos decorrentes, têm sido pessimistas: os resultados experimentais têm excedido os comportamentos teóricos previstos.

As fibras ópticas são meios importantes para os quais se enunciam as seguintes vantagens:

— Meios de transmissão de banda muito larga, não só no que respeita a banda associada a uma portadora mas, ainda, à disponibilidade total de espectro para operações de multiplexagem, que é enorme.

— Características de transmissão que dispensarão operações de igualização.

— Pouco peso e grande flexibilidade.

— Secção transversal muito pequena, o que permite acomodar muitas fibras numa única estrutura e explorar este facto, não só em multiplexagem mas ainda em novas concepções de transmissão de imagem.

— Reduzida «diafonia».

— Eventualidade de obtenção de fibras a baixo preço.

— Ausência de fenómenos indutivos típicos dos metais.

— Possibilidade de ligação unipolar.

— Existência de recursos naturais de materiais para o seu fabrico.

Além destas soluções, que são aquelas que vêm merecendo especial interesse, outras configurações se têm proposto, nomeadamente, fibras com índice de refracção com distribuição radial.

Também se têm proposto outras estruturas:

Tubos metálicos ocos, tubos de vidro, filmes dieléctricos

Resumindo: os meios ópticos estão em pleno desenvolvimento.

Neste momento os problemas fundamentais estão equacionados: desenvolvimento de estruturas com pequena atenuação e de fácil implementação; no que respeita a componentes, há que caminhar em matéria de fontes e interfaces, moduladores e detectores.

No entanto, julga-se que o processo é irreversível e que os meios ópticos se desenvolverão, sendo propícios e adequados às modernas técnicas digitais de transmissão da informação.

Neste contexto, surge uma nova disciplina que servirá de base às Telecomunicações: a Fotónica.

1.2.1.3 — A teoria da informação e a engenharia das comunicações

A importância de uma comunicação e a decorrente importância de se estabelecer uma rede de telecomunicações são factos que se admitem intuitivamente.

É matéria incontroversa que se aceita pelas múltiplas formas que as comunicações adquirem e do que daí resulta para a sociedade.

No entanto, só em 1948 se tomou consciência exacta do processo informativo atribuindo-lhe conceitos a parâmetros que iriam permitir definir objectivamente e matematicamente:

Quantidade de informação e capacidade de um canal de informação.

Deve-se essa contribuição a Shannon que conferiu unidade de trato ao processo informativo e o parametrizou: Teoria Matemática da Comunicação.

Como sempre, esta teoria teve antecedentes e precursores, nomeadamente Kelvin, Nyquist, Gabor, Wiener e Kotelnikov, mas é a teoria de Shannon que trata fenomenologicamente, e de modo completo, o problema.

Mais tarde essa teoria passou a ser a pedra fundamental da teoria nova que nasceu: a Teoria da Informação.

Teoricamente atraente, sofreu uma fase de dúvida sobre o seu interesse prático.

Os conceitos estavam certos mas para a época em que apareceu o campo de aplicações só se mostraria claro mais tarde. De 1948 até aos anos de 60 foi um período de aprendizagem e apropriação. É a partir dos anos de 70 que se afirma definitivamente.

De facto, é uma teoria que se dirige para processos difíceis e complexos, o que implica simultaneamente:

— Equacionamento de problemas graves de ruído.

— Grandes densidades de tráfego.

— Centros processadores de dados.

— Tecnologia disponível no que respeita à concepção e realização de equipamento.

— Generalização do recurso a computadores.

— Descentralização das unidades processadoras e sua fácil implementação numa rede de telecomunicações, o que se consegue hoje com os microprocessadores.

Já não restam dúvidas sobre a importância da Teoria da Informação:

— Como atitude e disciplina de actuação.

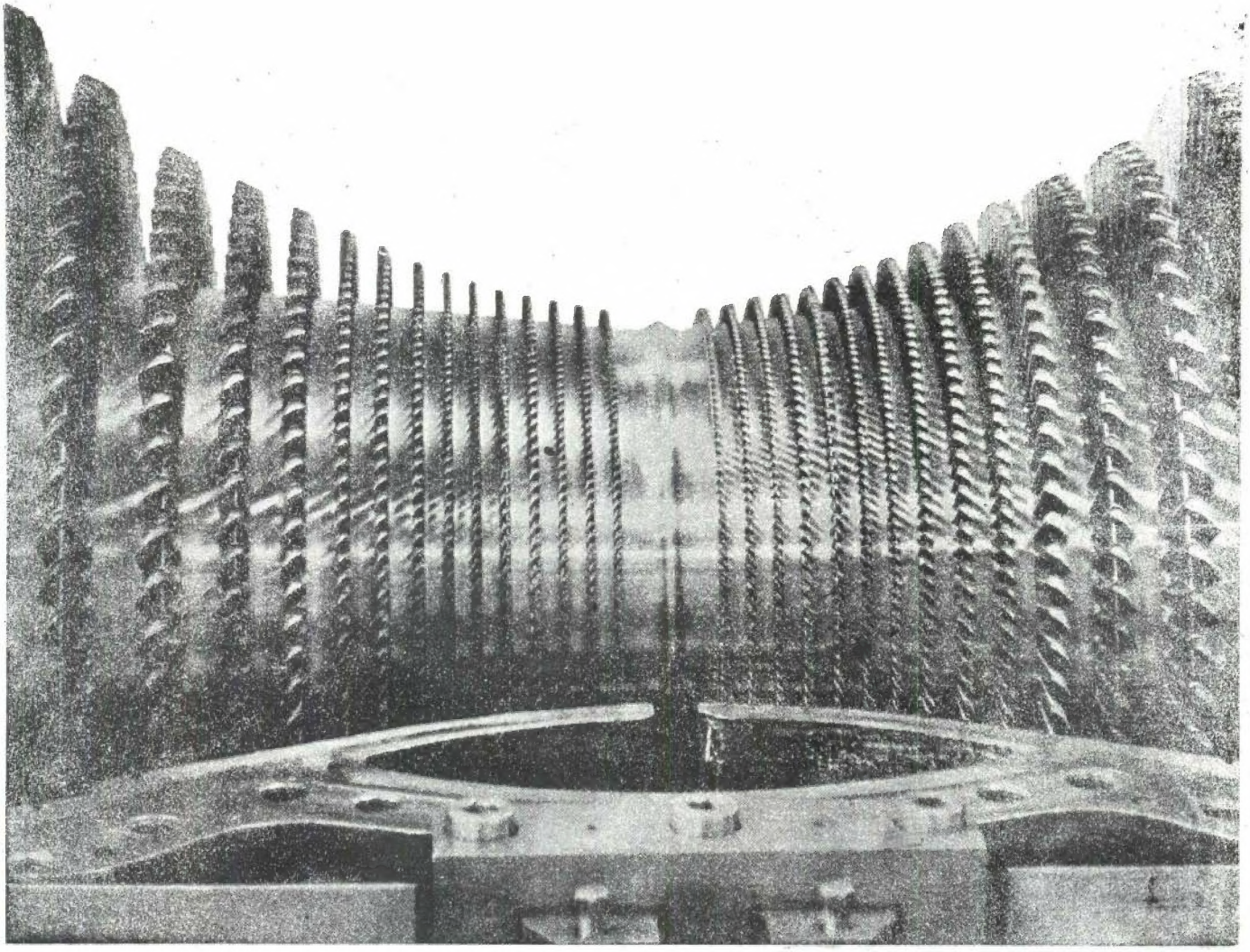
— Na possibilidade, que nos faculta, de comparar objectivamente sistemas de comunicações, permitindo estabelecer os limites máximos atingíveis no que respeita aos ritmos de informação e, decorrentemente, à eficiência dos canais em serviço.

— Encorajando decisivamente à digitalização, o que é fundamental para todas as formas de comunicação em uso e levará a uma expansão segura e consciente das redes de tratamento de dados.

A Teoria da Informação constitui-se, assim, a estrutura básica da moderna Engenharia de Sistemas de Telecomunicações.

BBC

BROWN BOVERI

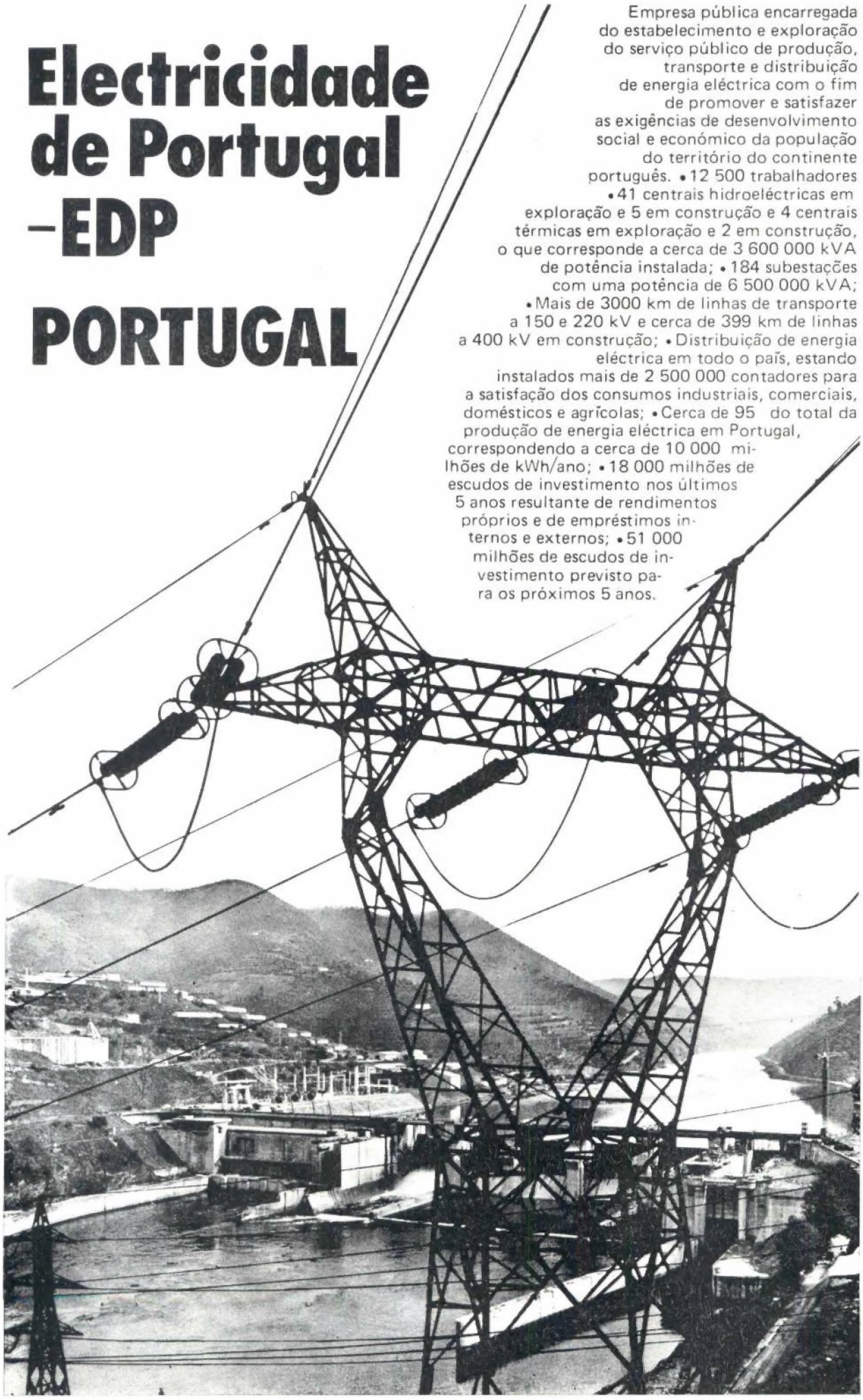


TECNICA IX

Electricidade de Portugal –EDP

PORTUGAL

Empresa pública encarregada do estabelecimento e exploração do serviço público de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica com o fim de promover e satisfazer as exigências de desenvolvimento social e económico da população do território do continente português. • 12 500 trabalhadores • 41 centrais hidroeléctricas em exploração e 5 em construção e 4 centrais térmicas em exploração e 2 em construção, o que corresponde a cerca de 3 600 000 kVA de potência instalada; • 184 subestações com uma potência de 6 500 000 kVA; • Mais de 3000 km de linhas de transporte a 150 e 220 kV e cerca de 399 km de linhas a 400 kV em construção; • Distribuição de energia eléctrica em todo o país, estando instalados mais de 2 500 000 contadores para a satisfação dos consumos industriais, comerciais, domésticos e agrícolas; • Cerca de 95 do total da produção de energia eléctrica em Portugal, correspondendo a cerca de 10 000 milhões de kWh/ano; • 18 000 milhões de escudos de investimento nos últimos 5 anos resultante de rendimentos próprios e de empréstimos internos e externos; • 51 000 milhões de escudos de investimento previsto para os próximos 5 anos.



* * *

Todos os trabalhos que convergiram para a Teoria da Informação assentaram na seguinte consideração básica:

Reconhecimento da acção condicionante do ruído que, em certa medida, não é essencialmente diferente do sinal.

Sinal e ruído convivem e qualquer dos dois têm carácter aleatório.

Extrair, de modo sistemático, o sinal do ruído seria, pois, o problema fundamental a resolver.

— Wiener interessou-se pela pesquisa e dimensionamento do filtro linear que, da melhor maneira e com atraso, separasse o sinal do ruído.

— Wiener generalizou o problema para o caso do atraso ser negativo, o que conduziu à Teoria da Predição, sobre intervalos finitos do futuro.

— Kolmogorov já tinha abordado, anteriormente, a questão da predição na ausência de ruído.

— Kotelnikov preocupou-se pela detecção e estimação de sinais no receptor.

— Shannon desenvolve uma teoria em que a separação do sinal do ruído está sempre presente, desde a codificação até à descodificação.

— O trabalho de Shannon aponta para a digitalização e constituiu-se base segura para a consciencialização e garantia do conceito de fiabilidade nos sistemas de comunicação.

* * *

Como se disse, Shannon desenvolveu uma estratégia que interessa todo o sistema desde a emissão à recepção.

A partir daí:

— A Fonte de Informação é estimada na base da quantidade de informação que gera num determinado intervalo de tempo e analisada no que respeita à natureza e diversidade de mensagens que emite.

— Entre a Fonte de Informação e o Canal de Informação insere uma unidade funcional importante: um Centro Codificador.

— A codificação vai permitir resolver problemas importantes:

— Adaptação da linguagem da fonte à linguagem do canal.

— Eliminar a natural redundância das fontes.

— Resistir à deterioração que o ruído introduz, permitindo reduzir o número de erros a um número arbitrariamente pequeno.

Resumidamente, pode dizer-se que a Teoria da Informação confere às comunicações um carácter probabilístico e dispõe de teoremas que permitem afirmar que o êxito de uma comunicação é um acontecimento quase certo desde que se jogue convenientemente com os parâmetros que conferem dimensionalidade ao Canal de Informação.

A quantidade máxima de informação que um canal — dispondo da largura de banda F e durante o tempo T — pode transmitir é igual ao produto de três factores:

— Tempo de transmissão: T

— Largura de faixa disponível: F

— Logarítmo do quociente da potência total em jogo — sinal e ruído — pela potência do ruído.

É um limite superior válido para ruído branco e gaussiano mas que é generalizável a outras formas de ruído.

Tem interesse salientar que o PCM se comporta, à parte um agravamento da potência do sinal da ordem de 9 dB, como o canal ideal de Shannon.

Tem interesse verificar que, por mais intenso que seja o ruído, há sempre a possibilidade de detectar um sinal desde que o ruído exiba uma estatística.

* * *

Na sua teoria, Shannon, trata separadamente e ordenadamente o Canal Discreto e o Canal Contínuo. Mais tarde reduz o canal contínuo ao discreto.

De facto, ainda em 1948, publica um trabalho fundamental onde nos expõe a filosofia do PCM, concebido já há alguns anos por Reeves. Foi mais uma contribuição importante que abriu definitivamente o caminho ao PCM e ao crescente interesse de ter presente a orientação que emerge da Teoria da Informação.

* * *

A redução do canal contínuo ao canal discreto assenta nas duas seguintes bases fundamentais:

— Teorema de amostragem, que permite converter um sinal de espectro limitado numa série discreta no tempo;

— Conceito de ruído de quantificação e possibilidade de o reduzir a valores aceitáveis à custa do número de níveis utilizados para quantificação e eventual distribuição não uniforme dos mesmos na gama dinâmica do sinal.

Nos anos de 1954 as operações de amostragem e quantificação suportavam-se nos tubos electrónicos de vácuo e o PCM apenas estava em curso nos laboratórios.

A Electrónica do Estado Sólido desenvolveu uma acção fundamental na generalização do sistema e, de um modo geral, de todas as técnicas digitais de encaminhamento e tratamento de informação.

* * *

Estes os aspectos fundamentais da Teoria da Informação.

Não cabe aqui entrar no pormenor.

Convém, no entanto, salientar que todos os grandes problemas e concepções das Telecomunicações se ligam de algum modo com a Teoria da Informação ou com a teoria mais pragmática e directamente associada, ou inclusa, que é a Teoria Estatística da Comunicação.

* * *

Antes de terminar este último capítulo sobre os factos dominantes das telecomunicações, convém ter

presente que o facto mais importante foi, na realidade, o seguinte:

As telecomunicações, no que respeita à análise, encaminhamento e tratamento da informação, passaram a dispor de um corpo teórico suportado em conceitos abstractos e, em certa medida, independentes do suporte físico dos sinais.

Em certa medida, porque alguma ligação parece existir entre as leis da Física e a Teoria da Informação.

E, também, porque a capacidade de um canal de informação estará de algum modo limitada pela estrutura íntima do processo físico onde se suporta.

Esta abstracção poderá conduzir a algumas frustrações por falta de disponibilidade tecnológica ou realidade económica.

No entanto, dessa abstracção ressalta uma enorme potencialidade:

As telecomunicações, embora dependentes da tecnologia, são tão vastas quanto o corpo de soluções que formos capazes de imaginar.

O estabelecimento de comunicações traduz a operação básica de inervar estruturas e sistemas que a partir daí podem reflectir e, em última análise, controlar as suas acções.

O processo informativo vai além dos serviços convencionais das telecomunicações.

Será difícil que um país em desenvolvimento, e por maiores que sejam os atrasos e limitações tecnológicas, não seja capaz de encontrar, no âmbito das comunicações, uma actividade própria: criadora, útil e rentável.

1.2.2 — Factos dominantes da electrónica

1.2.2.1 — Introdução

Uma análise, mesmo superficial da evolução dos dispositivos electrónicos, revela formas complexas de interligação com outras disciplinas, iniciadas de modo descontínuo, em épocas diferentes, e com motivações diversas.

O estado actual do seu desenvolvimento resulta desta interpenetração, e dum conhecimento aprofundado das propriedades físicas e químicas de materiais e compostos relevantes, nomeadamente dos semicondutores. O conjunto dos dispositivos electrónicos disponíveis imediatamente ou a curto prazo, tem como base um certo número de etapas na sua evolução, que resultam do estabelecimento de princípios fundamentais, e dum desenvolvimento tecnológico intenso, competitivo e contínuo, baseado nos conceitos económicos e industriais da produção em massa. Neste resumo, necessariamente incompleto, procura-se, em termos gerais descrever de forma breve a evolução até à data dos dispositivos electrónicos mais importantes, o seu panorama actual, e em certos casos, o seu desenvolvimento futuro.

Devido à extensão do texto, não se referem assuntos cuja importância é desde logo, incontroversa, como por exemplo os dispositivos semicondutores de rectificação controlada e para aplicações industriais, para conversão de energia solar, as memórias de amostragem de acoplamento pela carga (CCD), e dum modo geral, os transdutores ópticos e mostradores (displays), por não dizerem respeito directamente ao tema, ou se considerarem de importância secundária na sua evolução. Omitem-se também os dispositivos amplificadores paramétricos e os da electrónica quântica, dada a sua aplicação restrita e desenvolvimento separado.

Podemos considerar nesta evolução duas linhas de acção principais, de influência recíproca:

— a introdução de novos dispositivos, antecedendo por vezes o estabelecimento dos seus princípios fundamentais,
— o alargamento de características limites de dispositivos existentes, como por exemplo: potência, eficiência, ganho, distorção, ruído, largura de faixa, frequência de operação, redução dimensional, integração ou fiabilidade,

e distinguir duas épocas distintas no seu desenvolvimento:

— a da electrónica de vazio (até 1950), caracterizada pelo aperfeiçoamento descontínuo das propriedades dum único dispositivo (a válvula electrónica), motivado pelo seu emprego quase exclusivo em circuitos de Telecomunicações, cujo projecto se baseava nas suas características;
— a da electrónica do estado sólido (de 1950 à actualidade), identificada com o desenvolvimento contínuo de novos dispositivos, e a sua integração em sistemas funcionais, digitais e analógicos, alargando-se o seu emprego à computação, controlo de processos, aplicações industriais, etc.

1.2.2.2 — Desenvolvimento da electrónica de vazio

— Válvulas de carga espacial

A lâmpada, tubo ou válvula electrónica de dois eléctrodos (díodo), aproveitando o efeito termoiónico observado por Edison, para a rectificação, foi introduzido em 1904 (Fleming e Wehnelt). O seu impacto industrial imediato foi nulo. A lâmpada de três electrodos ou tríodo (De Forest, 1907), capaz de amplificar sinais, teve aplicação imediata em Telecomunicações, e marca o início da época do dispositivo electrónico propriamente dito (unidade compacta, provida de terminais, com domínio de aplicação específico, de características de operação conhecidas, fiáveis e reprodutíveis em grande escala, cujo custo, a menos duma parcela constante, é inversamente proporcional à quantidade). A industrialização deste componente foi acelerada com a I Guerra Mundial, de forma que em 1918 a produção mundial de tríodos excedia o